

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	7
AGRADECIMIENTOS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Objetivos	11
1.2. Alcance	12
1.3. Requerimientos	12
1.4. Justificación	12
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
2.1. Automóviles híbridos y eléctricos	14
2.1.1. Introducción al problema	14
2.1.2. Qué es un vehículo híbrido y sus componentes	16
2.1.3. Clasificación de los vehículos híbridos en función del tipo de configuración híbrida	21
2.1.4. Qué es un vehículo eléctrico y sus componentes	23
2.1.5. Clasificación de vehículos según el grado de electrificación	24
2.1.6. Distintivo ambiental	27
CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE	29
3.1. Teoría de la decisión Multicriterio	29
3.1.1. Introducción a la Teoría de la decisión	29
3.1.2. Conceptos Básicos	29
3.1.3. Optimalidad paretiana	31
3.1.4. Tasa de intercambio o trade off	31
3.1.5. Programación multiobjetivo	32
3.1.6. Programación compromiso	39
3.1.7. Programación por metas	42
3.1.9. Métodos Multicriterio discretos (I)	52
3.1.10. Métodos Multicriterio discretos (II)	58
3.1.11. Conclusiones del estado del arte	65

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE COCHES HÍBRIDOS	66
4.1. Elaboración del trabajo	67
4.1.1. Definición de criterios y subcriterios	67
4.1.2. Selección de las alternativas	70
4.1.3. Construcción de la tabla para el método programación compromiso	73
4.1.4. Super Decisions Software	74
4.1.4.1. Introducción al software	74
4.1.4.2. Construcción del modelo	76
4.1.4.3. Evaluación / comparación por pares	77
4.2. Aplicación del método Análisis Jerárquico (AHP)	78
4.3. Aplicación de la Programación compromiso	86
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	89
5.1. Resultados método AHP	90
5.2. Resultados método programación compromiso	92
5.3. Análisis de resultados	94
CAPÍTULO 6. PRESUPUESTO DEL ESTUDIO	96
6.1 Coste Total del estudio	96
6.1.1. Costes de personal	96
6.1.2. Costes de material	96
6.1.3. Costes indirectos	97
CAPÍTULO 7. IMPACTO AMBIENTAL	99
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES	100
CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA	102
ANEXO A- ALTERNATIVAS DE AUTOMÓVILES	107
A 1. Toyota Yaris 100 Hybrid	107
A 2. Kia Niro Hybrid	107
A 3. Hyundai Ioniq Hybrid	108
A 4. Mitsubishi Outlander PHEV	108
A 5. Volvo V60 T8 Twin Engine	109

ANEXO B- PROGRAMA SUPER DECISIONS	110
B 1. Construcción del modelo	110
B 2. Comparación por pares	110
B 2.1. Nivel jerárquico 2	110
B 2.2. Nivel jerárquico 3	110
B 2.3 Nivel jerárquico 4	111
B 3. Resultado final	114
ANEXO C- ENCUESTAS PARA LA PONDERACIÓN DE CRITERIOS	115
C.1. Encuesta tipo AHP	115
C.2. Encuesta programación compromiso	117
ANEXO D- AUTOINFORME DE CALIDAD (TFG / TFM)	118
ANEXO E- DECLARACIÓN DE HONOR	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de vehículos según el grado de electrificación	25
Tabla 2. Coordenadas de los puntos extremos eficientes.....	35
Tabla 3. Matriz de pagos.....	37
Tabla 4. Extracto de la tabla final del simplex para la primera iteración del método Zions & Wallenius.	50
Tabla 5. Matriz decisional.....	52
Tabla 6. Matriz decisional inicial.....	54
Tabla 7. Matriz de índices de concordancia	54
Tabla 8. Matriz de decisión normalizada	55
Tabla 9. Matriz de decisión normalizada y ponderada.....	56
Tabla 10. Matriz de índices de discordancia.....	56
Tabla 11. Matriz de dominancia concordante Fuente: Elaboración propia	57
Tabla 12. Matriz de dominancia discordante	57
Tabla 13. Matriz de dominancia agregada	58
Tabla 14. Escala de preferencias	60
Tabla 15. Matriz de comparación por parejas para el nivel jerárquico 2.	60
Tabla 16. Matriz de comparación por parejas y estimaciones de pesos relativos para el nivel jerárquico 3.....	62
Tabla 17. Matriz de comparación por parejas y estimaciones de pesos relativos para el nivel jerárquico 3.....	62
Tabla 18. Matriz de comparación por parejas y estimaciones de pesos relativos para el nivel jerárquico 3.....	62
Tabla 19. Determinación de los pesos globales.....	63
Tabla 20. Matriz de clasificación de Arrow-Raynaud	64
Tabla 21. Matriz de clasificación luego de eliminar la alternativa b	64
Tabla 22. Especificaciones de las alternativas. Criterio Coste.....	72
Tabla 23. Especificaciones de las alternativas. Criterio Comodidad	72
Tabla 24. Especificaciones de las alternativas. Criterio eficiencia del automóvil.	73
Tabla 25. Especificaciones de las alternativas. Criterio Adicionales	73
Tabla 26. Especificaciones de las alternativas.....	74
Tabla 27. Matriz de comparación por parejas para el nivel jerárquico 2	79
Tabla 28. Pesos relativos para el nivel jerárquico 2	80
Tabla 29. Matriz de comparaciones para el nivel jerárquico 3	81
Tabla 30. Estimación de pesos relativos para el nivel jerárquico 3	81
Tabla 31. Matriz de comparación para el nivel jerárquico 4	83
Tabla 32. Estimación de pesos relativos para el nivel jerárquico 4	85
Tabla 33. Determinación de los pesos globales Fuente: Elaboración propia	86
Tabla 34. Datos normalizados	86
Tabla 35. Pesos relativos de cada criterio, subcriterio y los pesos globales de cada subcriterio.	87
Tabla 36. Solución compromiso	88
Tabla 37. Resultado Análisis Jerárquico	90
Tabla 38. Resultados encuestas Análisis Jerárquico (AHP).....	91
Tabla 39. Resultado a través del Método Programación Compromiso	92
Tabla 40. Resultados encuestas Programación Compromiso	93
Tabla 41. Costes asociados al personal	96
Tabla 42. Costes asociados al material	97
Tabla 43. Amortización anual según la vida útil Fuente: Elaboración propia	97

Selección de un automóvil híbrido.

Tabla 44. Otros costes asociados Fuente: Elaboración propia	97
Tabla 45. Coste total del estudio	98
Tabla 46. Emisiones de CO2	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica del aumento de la temperatura media del planeta	14
Figura 2. Motor térmico y sus partes	16
Figura 3. Tipos de motores eléctricos	17
Figura 4. Generador de corriente alterna	17
Figura 5. Paquetes de baterías de alta tensión.....	18
Figura 6. Esquema del sistema de cableado de alta tensión.....	18
Figura 7. Inversor de 24V.....	19
Figura 8. Esquema del paso de CC (corriente continua) de la batería por el inversor y entrada al motor como CA (corriente alterna).....	19
Figura 9. Esquema de la transmisión eléctrica de un vehículo	20
Figura 10. Esquema del sistema de frenado regenerativo	20
Figura 11. Configuración del sistema en serie	21
Figura 12. Configuración del sistema en paralelo	22
Figura 13. Configuración del sistema combinado o mixto	22
Figura 14. Configuración de un automóvil eléctrico.....	23
Figura 15. Diagrama del sistema convertidor	24
Figura 16. Conjunto de soluciones posibles en el espacio de las variables de decisión.....	34
Figura 17. Conjunto eficiente en el espacio de los objetivos.	35
Figura 18. Grafo Electre y núcleos asociados	58
Figura 19. Academias alternativas de baile en la ciudad de Barcelona	59
Figura 20. Metodología para la selección de un automóvil híbrido.....	66
Figura 21. Proceso de la modelación de un problema de multicriterio, software Super Decisions	75
Figura 22. Representación abstracta de una decisión jerárquica Fuente: www.Superdecisions.com ...	76
Figura 23. Construcción del modelo	76
Figura 24. Comparación por pares tipo cuestionario Super Decisions Fuente: Super Decisions Software	77
Figura 25. Matriz de comparación por pares Super Decisions Fuente: Super Decisions Software	78
Figura 26. Alternativas para la selección de un automóvil Híbrido: Representación jerárquica	79
Figura 27. Gráfica de resultados de encuestas Método AHP	94
Figura 28. Gráfica de resultados de encuestas: Método Programación Compromiso	95

AGRADECIMIENTOS

Cerrando este capítulo de mi vida, con el trabajo final de máster. Puedo expresar, que mi experiencia durante estos dos años de estudios ha sido increíble. He tenido altos y bajos, pero me han servido para crecer tanto personal como profesionalmente.

Estoy inmensamente agradecida con mi profesor Carles Ferrer Ferrer, por apoyarme durante el desarrollo de mi tesis. Quiero hacer una mención especial y reconocimiento al profesor Bruno Domenech Léga, quien me ha brindado todas las herramientas, su tiempo y conocimientos para realizar el estudio.

Quiero agradecer a mis colegas del máster, que me apoyaron e hicieron única y divertida mi experiencia. Especialmente a Borja Cámara, Javier Barrios, Berta Porras, Marina Malgosa y Manel Martínez. Definitivamente, sin ellos no hubiese sido igual.

Quiero agradecer a mi familia y amigos, que siempre estuvieron presentes y me brindan su apoyo. Por último, pero no menos importante, agradecer infinitamente a mis padres: NELSON DÁVILA y CAROLINA FERREBÚS quienes estuvieron y están siempre disponibles para apoyarme en cualquier empresa que yo emprenda.

RESUMEN

Innumerables veces las personas y compañías se encuentran en situaciones que tienen que resolver problemas decisionales y no saben cómo abordarlos. Para ello, existen las herramientas enfoques multicriterio que permiten encontrar la solución a dicha problemática. La tesis pretende realizar un estudio de aplicación de análisis multicriterio para la toma de decisión en la selección de un automóvil híbrido a través de los enfoques multicriterio, conocidos como análisis jerárquico y programación compromiso. Primero, se realiza una breve descripción del problema y una revisión bibliográfica en el ámbito de automóviles híbridos y eléctrico. Donde, se exponen sus componentes y otros conceptos relevantes. Seguido, se investiga acerca de los enfoques multicriterio, explicando brevemente cada uno de los conceptos importantes en la teoría de la decisión y la metodología empleada en dichos enfoques. A continuación, se seleccionan los criterios y alternativas de automóviles para la aplicación del estudio. Una vez culminado, se ejecuta la aplicación del método análisis jerárquico con el uso del programa Super Decisions, para la selección del automóvil híbrido. Posteriormente, se aplica el método de la programación compromiso, donde los cálculos se realizan con el programa de Excel. Nuevamente, se realiza el estudio de aplicación para 10 personas que fueron previamente encuestadas para saber sus preferencias con respecto a las alternativas. Inmediatamente, se obtienen las opciones de automóviles híbridos más favorables para cada persona, y se discuten los resultados obtenidos. Finalmente, se dan las conclusiones pertinentes al estudio.

ABSTRACT

Countless times people and companies find themselves in situations that must solve decisional problems and do not know how to tackle them. For this, there are multi-criteria approach tools that allow finding the solution to this problem. The thesis aims to carry out an application study of multi-criteria analysis for decision-making in the selection of a hybrid car through multi-criteria approaches, known as hierarchical analysis and commitment programming. First, a brief description of the problem and a bibliographic review in the field of hybrid and electric cars are made. Where, its components and other relevant concepts are exposed. Next, the multi-criteria approaches are investigated, briefly explaining each of the important concepts in decision theory and the methodology used in these approaches. Next, the criteria and alternatives of automobiles for the application of the study are selected. Once completed, the application of the hierarchical analysis method is executed with the use of the Super Decisions program for the selection of the hybrid car. Subsequently, the commitment programming method is applied, where the calculations are made with the Excel program. Again, the application study is carried out for 10 people who were previously surveyed to find out their preferences regarding the alternatives and immediately, the most favorable hybrid car options for each person are obtained, and the results obtained are discussed. Finally, the conclusions relevant to the study are given.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo, se hará una breve introducción a la problemática de estudio: los problemas con los que se enfrenta una persona en el momento de comprar un coche híbrido. Seguido, se exponen el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo. Posteriormente, el alcance del estudio. Luego, los requerimientos para lograr realizar el trabajo. Por último, se justifica la necesidad del trabajo realizado en esta tesis.

A nivel mundial, se están tomando medidas para disminuir las emisiones de CO₂, aplicando normativas dirigidas hacia los fabricantes de coches (Ros & Barrera ,2017). De esta manera, ayudan a evitar el aumento del calentamiento global. A partir del 1 de enero de 2020, entró en vigor la nueva normativa europea: REGLAMENTO (UE) 2019/631 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 17 de abril de 2019, que limita las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) de los vehículos ligeros y que obligará a los fabricantes, a que la media de sus automóviles vendidos en la región a partir de 2020 no genere más de 95 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido (BOE). Todo aquel vehículo vendido a partir de la fecha mencionada tiene que cumplir con la normativa. Conjuntamente, el parlamento de Cataluña aprueba la Ley 9/2019, de 23 de diciembre, de modificación de la Ley 16/2017, del cambio climático, en cuanto al impuesto sobre las emisiones de dióxido de carbono de los vehículos de tracción mecánica. Donde, se gravará los vehículos en función de sus emisiones. De tal manera que sanciona más a aquellos que emiten más CO₂ (BOE).

A raíz de estas normativas, que están implementando, el sector automotriz ha tenido que buscar la manera, de que los coches funcionen con otras tecnologías. Por tanto, están fabricando automóviles con fuentes de energías que sean menos contaminantes (Ros & Barrera ,2017). Consecuentemente, estas legislaciones, también afectan en los usuarios. Así, las personas se han visto en la necesidad de tener que adquirir automóviles híbridos o eléctricos.

1.1. Objetivos

- ❑ El objetivo principal de la tesis a desarrollar es realizar un estudio de aplicación de análisis multicriterio para la toma de decisión en la selección de automóviles híbridos existentes en el mercado, en base a las necesidades de cada cliente potencial. Para lograrlo, se utilizaron una serie de herramientas y técnicas multicriterio: El análisis jerárquico y la programación compromiso. Posteriormente, se discuten los resultados obtenidos y luego se dan las conclusiones del estudio.

Para cumplirse el objetivo principal del estudio, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

Selección de un automóvil híbrido.

- ☐ Realizar una revisión exhaustiva del estado del arte para familiarizarse con las técnicas multicriterio. Si bien es cierto que han sido introducidas en el máster, aun así, no han sido estudiadas en detalle.
- ☐ Realizar una revisión bibliográfica acerca de los automóviles híbridos y eléctricos existentes en el mercado, para profundizar los conocimientos acerca de estas nuevas tecnologías.
- ☐ Visitar distintos concesionarios de la ciudad de Barcelona, para obtener información acerca de los criterios de selección para la compra de un automóvil híbrido y el funcionamiento de esta nueva tecnología.

1.2. Alcance

En el presente estudio se aplica el análisis jerárquico y la programación compromiso para la elección de un automóvil híbrido. Los cuales, han sido aplicados siguiendo la metodología correspondiente en base a la revisión bibliográfica realizada previamente. Luego, se obtiene la mejor alternativa de automóvil. Posteriormente, se discuten los resultados. Por último, se llegan a las conclusiones del estudio.

1.3. Requerimientos

Para poder llevar a cabo dicho estudio, se realizan distintas revisiones bibliográficas a través de libros, revistas científicas y trabajos anteriores. Además, se acude a varios concesionarios en la ciudad de Barcelona para obtener información profesional acerca de los automóviles híbridos, con sus respectivos criterios de selección para adquirir uno de ellos. En el proceso de aplicación del análisis jerárquico para la elección del automóvil se utiliza el software llamado Super Decisions, que es empleado como herramienta para implementar el proceso mencionado anteriormente. También el programa Excel se aplica para los cálculos correspondientes en la ejecución de la programación compromiso.

Se realizan encuestas a 10 personas aleatoriamente para aplicar el método AHP y programación compromiso. Finalmente, se dan los resultados obtenidos para dar las respectivas conclusiones en el trabajo y futuras recomendaciones.

1.4. Justificación

En la vida cotidiana las personas enfrentan con frecuencia situaciones donde tienen que tomar decisiones. Ejemplos: a) Una señora quiere decidir qué supermercado visitar, tal vez, seleccione el que esté más cercano a su casa b) Un señor quiere inscribirse en un gimnasio y se decide por el más económico. Se puede observar que en las dos situaciones las personas basan su elección en un solo

Selección de un automóvil híbrido.

criterio, la distancia más corta y el menor precio respectivamente. Sin embargo, las personas cuando se encuentran en un problema de decisión se inclinan por una alternativa u otra en base a distintos criterios; Para los ejemplos mencionados anteriormente también podría tomarse en cuenta: Atención al cliente, variedad de los productos y servicio. En el caso de las empresas ocurre de igual manera, para tomar decisiones importantes que repercuten en el desempeño de la compañía se basan en diferentes criterios; Por ejemplo, si una empresa desea comprar maquinaria nueva para la fábrica, podría tomar en cuenta: Coste, tamaño, marca y eficiencia del motor.

Estos y otros ejemplos pueden reflejar que en la vida cotidiana se presentan diferentes circunstancias en donde se hacen elecciones basadas en distintos criterios u objetivos. Debido a esto, existen diferentes científicos, investigadores y profesionales en el tema que han desarrollado varios métodos y técnicas para utilizarlos como herramientas en la toma de decisiones que ayudan a obtener una solución lo más óptima posible.

Ahora bien, con las nuevas leyes y normativas que se mencionaron anteriormente, las personas están optando por comprar automóviles híbridos y eléctricos. Sin embargo, numerosas veces, se les hace difícil tomar una decisión de cuál coche adquirir. Para ello, los enfoques multicriterio, son herramientas que se pueden utilizar para resolver esta situación.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo, se realiza una descripción del problema. Para ello, en el primer apartado se realiza una breve introducción al problema. Posteriormente, en el segundo apartado, se describe qué es un vehículo híbrido y sus componentes. Después, en el tercer apartado, se clasifican los vehículos híbridos en función del tipo de configuración híbrida. Luego, en el cuarto apartado, se define qué es un vehículo eléctrico y sus componentes. Consecutivamente, en el quinto apartado, se detalla la clasificación de los vehículos según el grado de electrificación. Por último, en el sexto apartado, se muestran las distintivas ambientales, empleadas por la Dirección General de Tráfico (DGT).

2.1. Automóviles híbridos y eléctricos

2.1.1. Introducción al problema

Actualmente es mayor la preocupación mundial en lo que se refiere a los cambios climáticos que se han ido observando a lo largo de los últimos años. Muchas investigaciones han reflejado el aumento de las concentraciones de los gases invernadero en la atmósfera trayendo como consecuencia el aumento del calentamiento global (Ver figura 1).

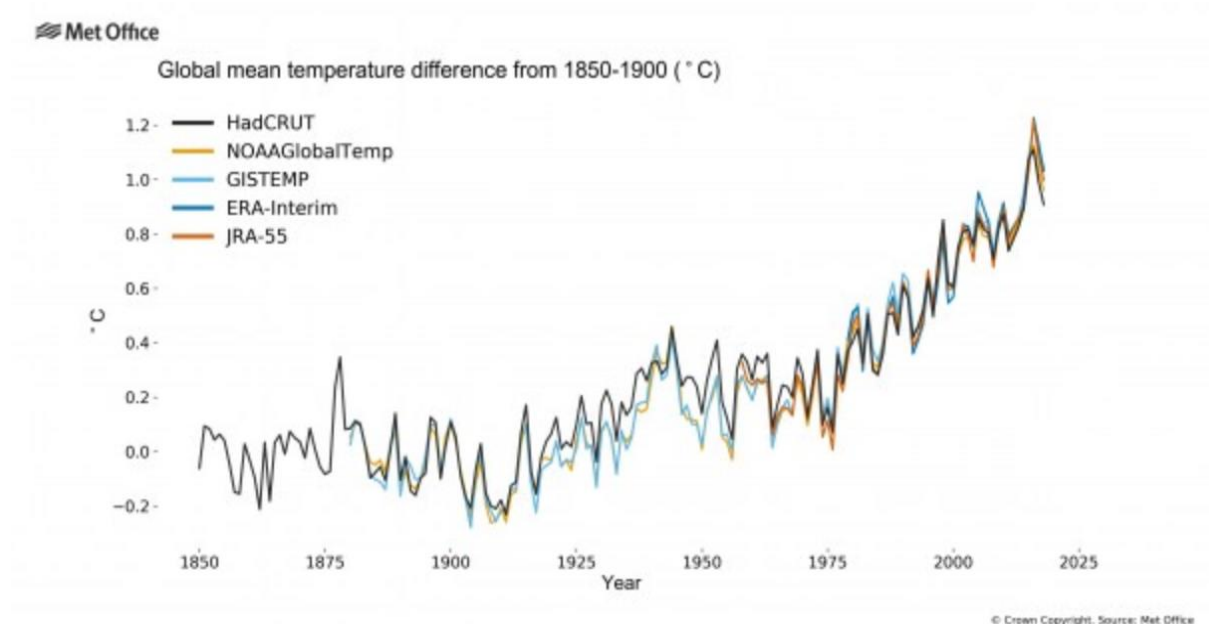


Figura 1. Gráfica del aumento de la temperatura media del planeta

Fuente: ONU

La atmósfera está compuesta principalmente por Oxígeno (O_2) y Nitrógeno (N_2), con un porcentaje del 21 % y 78 % respectivamente, es decir, 99%, los cuales son gases que permiten el ingreso y la salida de energía que es recibida por el sol. El resto de la atmósfera (1%) está compuesta por otros gases llamados

Selección de un automóvil híbrido.

gases invernadero, el dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido nitroso (NO_2), Ozono (O_3) y vapor de agua (H_2O) que se encargan de absorber y reemitir la radiación infrarroja lo cual produce el efecto invernadero debido a que retiene una parte de la energía proporcionada por el sol. El efecto invernadero es un mecanismo natural que hace que la tierra se mantenga a una temperatura adecuada para poder vivir en el planeta tierra, de lo contrario la temperatura sería de -18 grados. (Revista ingeniería, 2011).

Sin embargo, han aumentado las concentraciones de gases invernadero en la atmósfera en su mayor parte como consecuencia de las actividades humanas. El aumento de las emisiones de CO_2 proviene principalmente de la producción de energía por combustión de carbón, petróleo, entre otros.

La combustión de hidrocarburos en los motores térmicos hace que haya una producción de vapor de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2), así como también en menor proporción monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos (H_xC_y), entre otros. A pesar de que el vapor de agua y el dióxido de carbono son gases sin residuos tóxicos, el aumento de las emisiones del CO_2 hacia la atmósfera son cada vez mayores, lo que hace que la concentración de los gases aumente, provocando un incremento del efecto invernadero y como consecuencia el aumento de la temperatura media del planeta. Debido a la situación, se están tomando diferentes acciones que ayuden a mejorar la gravedad de lo que está ocurriendo. Así mismo, en el sector automotriz se están implementando normativas a nivel mundial, que obliga a las empresas encargadas de dicho sector a que utilicen otras tecnologías con diferentes fuentes de energías para la propulsión del vehículo. Las cuales sean menos contaminantes y así ayuden a disminuir la emisión de CO_2 . Actualmente, son muchas las compañías, que ya están aplicando distintas tecnologías en pro de la disminución del calentamiento global tal como Toyota, Opel, Mitsubishi, Honda, etc. fabricando automóviles con motores eléctricos, recuperadores de energía, baterías de alta tensión e híbridos (Revista ingeniería, 2011). En consecuencia, algunas personas, están prefiriendo comprar automóviles con estas nuevas tecnologías. Sin embargo, muchas veces, se encuentran en la dificultad de no estar al tanto, de cómo tomar la decisión, para seleccionar uno de ellos entre las alternativas. Cuando lo van a adquirir en los concesionarios, debido a que: "El mercado del automóvil está cada vez más saturado de segmentos y de tipos de vehículos. Los fabricantes ofrecen cada vez más alternativas, lo que se traduce en un entorno difuso para el usuario que desea comprar un coche" (Toyota, 2019). Conjuntamente, los clientes no tienen suficiente información de: qué son y cómo funcionan los coches híbridos y/o eléctricos, lo que hace más difícil tomar una decisión, para saber cuál vehículo se adapta más a sus necesidades.

2.1.2. Qué es un vehículo híbrido y sus componentes

Los vehículos o automóviles híbridos son aquellos que combinan dos tipos de motores: El primero de combustión interna, el cual es una máquina térmica capaz de transformar la energía térmica almacenada en un fluido combustible en energía mecánica proporcionando un trabajo y el segundo que funciona con energía eléctrica, es decir, dicha energía que se utiliza para impulsar el vehículo proviene de baterías y se alterna con el motor de combustión interna que mueve el generador.

Los componentes o elementos de un sistema en un vehículo híbrido según la empresa Toyota son los siguientes:

- ❑ **Motor térmico:** Máquina térmica que produce energía mecánica por el aprovechamiento de la energía térmica almacenada en un fluido por medio de una combustión. (González, 2015).

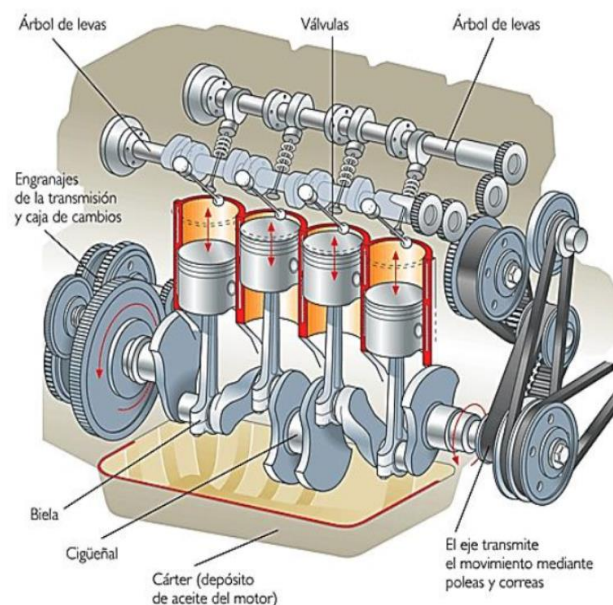


Figura 2. Motor térmico y sus partes

Fuente: Méndez, Cely & Monar

- ❑ **Motor eléctrico:** Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotatorias que transforman la energía eléctrica en energía mecánica que se alimenta de la electricidad que le proporciona la batería de alto voltaje, que a su vez bebe del motor de combustión y de la energía que se genera en las desaceleraciones. (Galán, 2019). Existen dos clasificaciones para estos motores que se verán con mayor claridad en la figura 3 a continuación (Ros & Barrera, 2017):

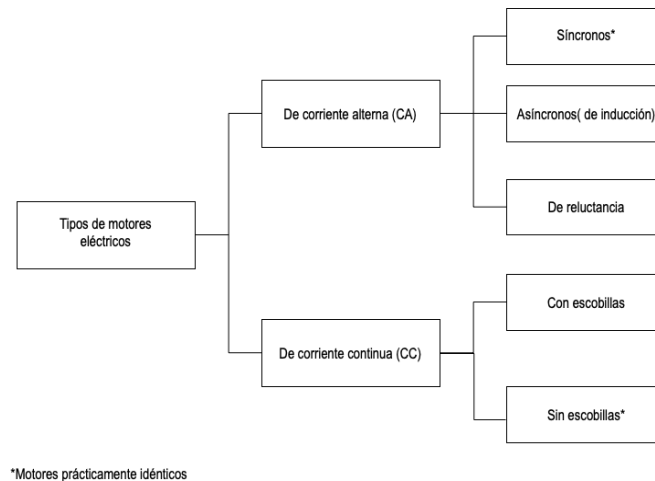


Figura 3. Tipos de motores eléctricos

Fuente: Elaboración propia

- ❑ **Generador:** Es un segundo motor eléctrico con el que cuenta el vehículo de tipo síncrono y conocido históricamente como alternador. Se encarga de convertir la energía mecánica en energía eléctrica de corriente alterna, es decir, recibe la potencia que proviene del motor térmico y la entrega a la batería de alta tensión (Toyota, 2008).

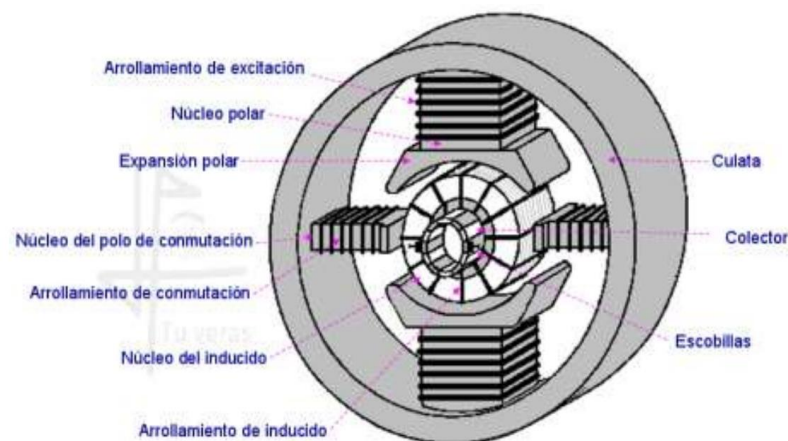


Figura 4. Generador de corriente alterna

Fuente: Pernía

- ❑ **Baterías de alto voltaje:** Son elementos que tienen la capacidad de transformar la energía eléctrica en química. Se encargan de recibir la electricidad proveniente de los motores térmicos y eléctricos para almacenarla y entregarla cuando sea necesario al sistema (Barros, 2015).



Figura 5. Paquetes de baterías de alta tensión

Fuente: Mayorga

- ❑ **Cableado de alta tensión:** Son los cables de alimentación que se encargan de transportar la corriente directa de alto voltaje entre las baterías de alta tensión, el inversor y los motores (eléctricos (Mayorga, 2018). (Research Journal 2018, Vol. 3, No. 8, pp. 1-13)

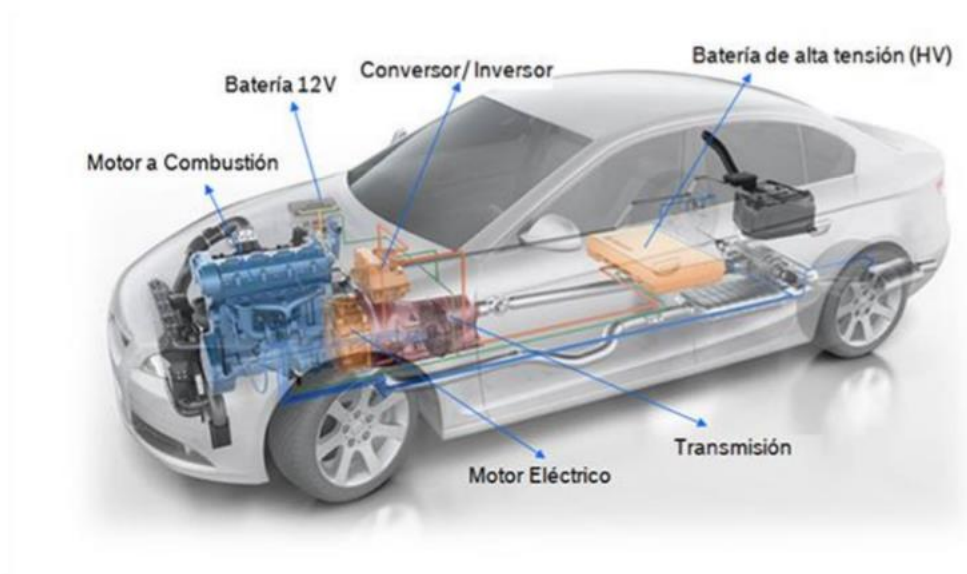


Figura 6. Esquema del sistema de cableado de alta tensión

Fuente: Galán

- ❑ **Inversores:** Se encarga de transformar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida, pero de corriente alterna. En el caso de los automóviles híbridos su función es invertir la electricidad de alto voltaje que proviene de las baterías de alto voltaje a la electricidad trifásica de corriente alterna que hace la impulsión de los motores eléctricos. Así como también, convierte la corriente alterna del generador y frenado regenerativo a corriente continua que recarga las baterías de alta tensión (Jurado ,2016).



Figura 7. Inversor de 24V

Fuente: Jurado

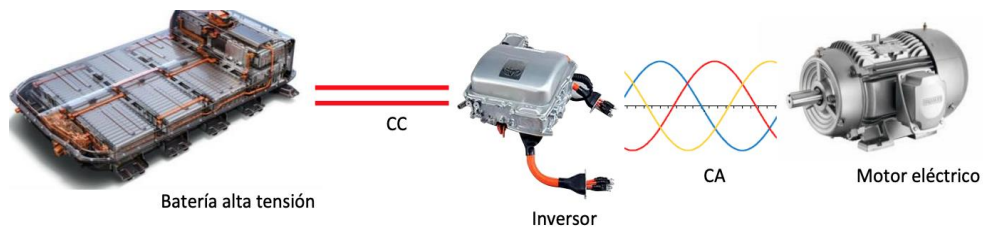


Figura 8. Esquema del paso de CC (corriente continua) de la batería por el inversor y entrada al motor como CA (corriente alterna)

Fuente: galán

- ❑ **Transmisores:** Son los equipos y elementos que permiten acoplar y conectar entre los otros subsistemas tal como engranes rectos, helicoidales, así como conexiones por cadena con la finalidad de transmitir el giro del motor hasta las ruedas y poder adaptarse a las necesidades para la conducción del vehículo (Domínguez & Ferrer 2012).

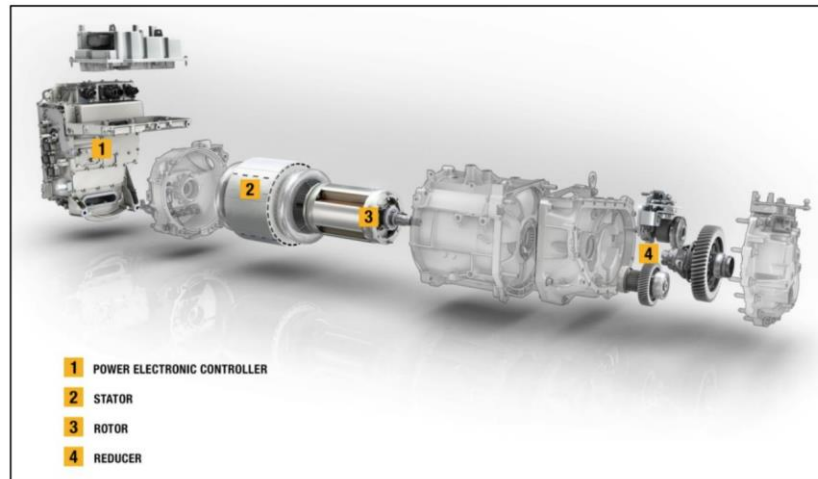


Figura 9. Esquema de la transmisión eléctrica de un vehículo

Fuente: Galán

- ❑ **Sistema de frenos regenerativos:** Este tipo de sistemas son utilizados en automóviles híbridos con la combinación de dos tipos de motores, el de combustión interna y el eléctrico. Funciona convirtiendo la energía cinética del vehículo en energía eléctrica, es decir, se encarga de almacenar la energía que se pierde en forma de calor durante el frenado en vehículos a combustión interna, y utiliza parte de dicha energía en otro momento cuando el automóvil lo necesite, tanto como para desplazarse o para el consumo de energías en otros apartados del automóvil híbrido (Méndez, A., Cely, M., Monar, W. 2016).

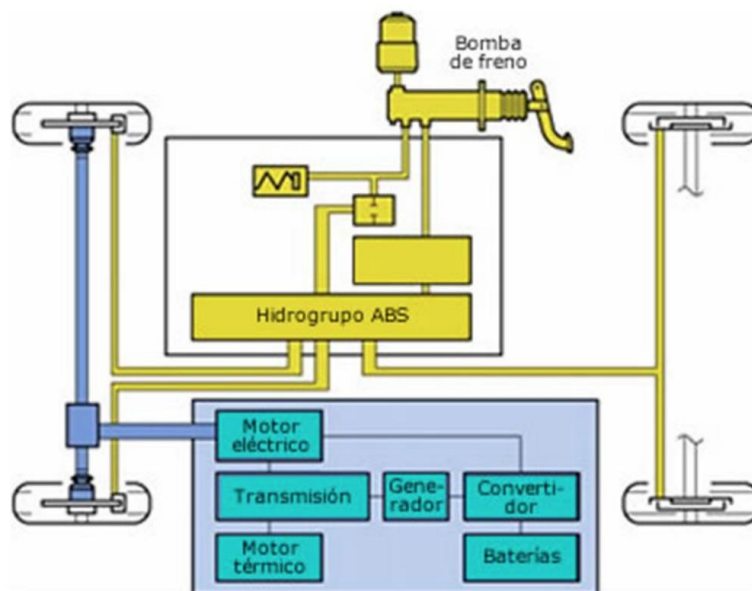


Figura 10. Esquema del sistema de frenado regenerativo

Fuente: Acosta

- ❑ **Batería auxiliar:** En algunos automóviles híbridos instalan una batería extra de aproximadamente 12v para poder alimentar distintos elementos de ellos, tal como las luces, el sistema de sonido, entre otros (Toyota, España).

2.1.3. Clasificación de los vehículos híbridos en función del tipo de configuración híbrida

- ❑ **Híbrido en serie:** En este tipo de configuración la impulsión del automóvil es generada por el motor eléctrico. Dicho motor se alimenta de un generador que a su vez es movido por el motor de combustión interna, el cual se usa para generar electricidad y cargar el paquete de baterías (Jurado, 2016). Su funcionamiento es parecido al del vehículo eléctrico, sin embargo, en este caso se puede generar energía mientras están circulando y así poder cargar las baterías y alcanzar una mayor autonomía (Galán, 2019).

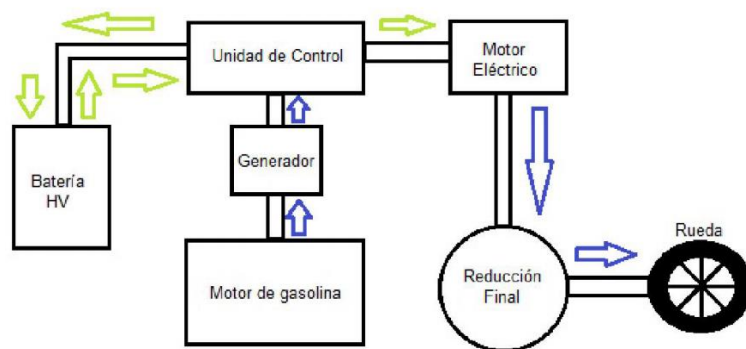


Figura 11. Configuración del sistema en serie

Fuente: Jurado

- ❑ **Híbrido en paralelo:** La impulsión del vehículo viene dado por el motor eléctrico y el motor térmico, los cuales pueden trabajar cada uno de manera independiente o en conjunto. Dichos motores se encuentran acoplados al eje de accionamiento final de las ruedas (Galán, 2019). Sin embargo, la fuente principal de propulsión proviene del motor térmico debido a la poca autonomía que tiene la batería híbrida. Así mismo, el motor eléctrico ayuda a potenciar la aceleración, y al frenar o desacelerar aprovecha esa energía para cargar las baterías (Jurado, 2016).

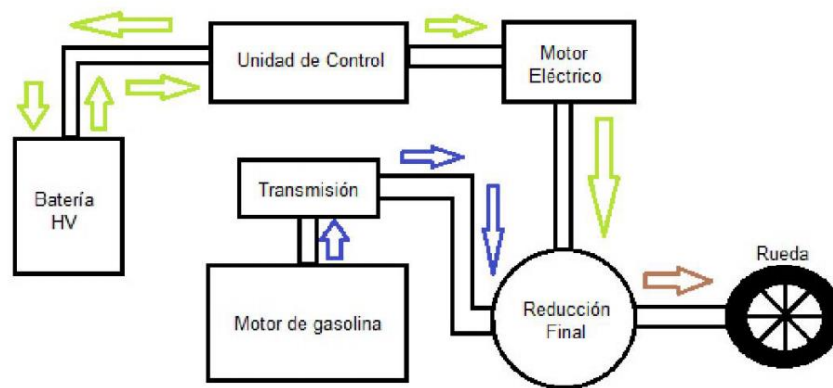


Figura 12. Configuración del sistema en paralelo

Fuente: Jurado

- ❑ **Híbrido combinado:** En este tipo de configuración se combinan las dos anteriores, conectando el motor térmico, motor eléctrico y el generador mediante un engranaje planetario. El motor eléctrico funciona a baja y a alta velocidad, el motor de combustión interna trabaja junto con el motor eléctrico para tener un mayor rendimiento del vehículo (Jurado, 2016).

En este sistema el vehículo funcionara como híbrido paralelo bajo condiciones normales, combinando las potencias de los motores eléctrico y térmico, pero para los requerimientos de las funciones de tracción podría funcionar en serie, así la energía del motor térmico se utiliza para mover el generador y producir energía eléctrica (Galán, 2019).

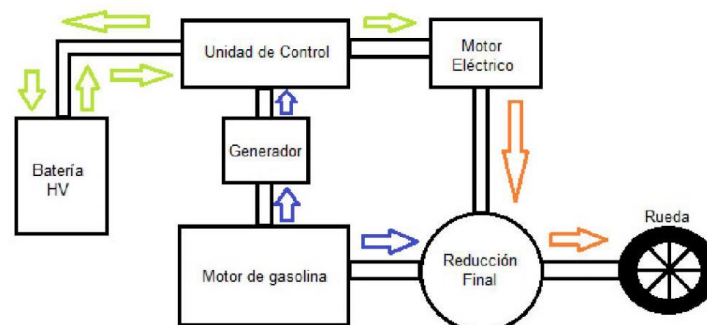


Figura 13. Configuración del sistema combinado o mixto

Fuente: Jurado

2.1.4. Qué es un vehículo eléctrico y sus componentes

El vehículo eléctrico es aquel que está propulsado totalmente por energía eléctrica que viene de baterías que se recargan en la red eléctrica. La principal característica del funcionamiento de un automóvil eléctrico es que la fuente de energía empleada para el movimiento es electricidad. Para que esto ocurra se sustituye el motor de combustión interna por uno o varios motores eléctricos, los cuales se mueven por la energía eléctrica almacenada en el paquete de baterías acumuladoras de gran capacidad. La energía química que se encuentra en las baterías de alta tensión se transforma en energía eléctrica, la cual servirá para que el motor pueda funcionar y proporcionar la tracción necesaria al eje motriz del vehículo (Galán, 2019).

Los componentes más importantes de un automóvil eléctrico son: la batería de alta tensión, el sistema de gestión de baterías, y la unidad de recarga interna (la infraestructura de recarga externa no forma parte directa del vehículo eléctrico); inversor CC/CA y convertidor CC/CC eléctrico; y motor eléctrico. Algunos de los conceptos ya fueron definidos previamente en el apartado 2.2.2.

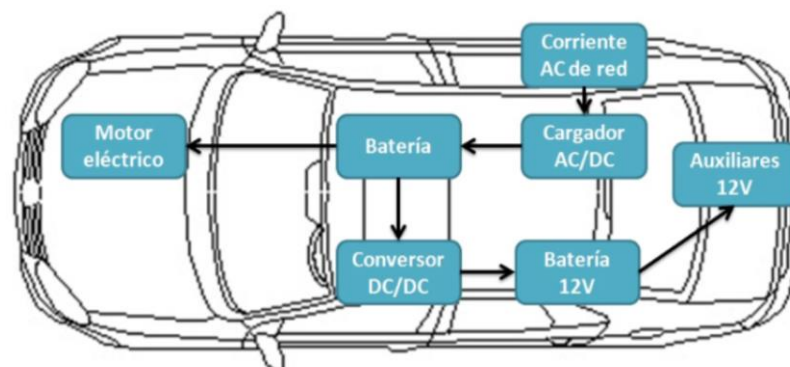


Figura 14. Configuración de un automóvil eléctrico

Fuente: Simon Electric

- ❑ **Conversores:** son equipos que transforman la tensión de la electricidad que proviene de las baterías, haciendo que disminuya su tensión hasta un nivel de 12 Voltios, normalmente la tensión de funcionamiento de los elementos auxiliares de vehículo eléctrico, tales como la iluminación y los sistemas de control, entre otros (Simon Electric).

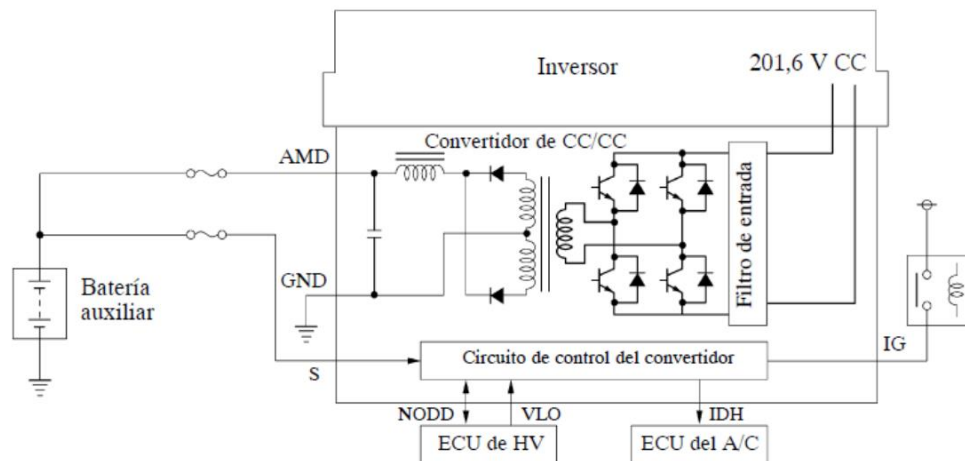


Figura 15. Diagrama del sistema convertidor

Fuente: Acosta

- ❑ **Unidad de carga y potencia interna:** tiene como función poder transformar en corriente continua la energía de corriente alterna proveniente de la red eléctrica, y así poder cargar la batería del vehículo eléctrico.

2.1.5. Clasificación de vehículos según el grado de electrificación

Bajo el nombre de vehículo eléctrico o híbrido existe una variedad de tecnologías que han venido saliendo a la luz poco a poco desde hace más de 100 años. Al pasar del tiempo se han ido creando distintas formas de llamar a las técnicas empleadas e ir diferenciando una de la otra. Sin embargo, sigue existiendo ciertas confusiones en los manuales de taller, en publicidades, documentos de fabricantes y aún más importante, en la comunicación de los talleres en cuanto a los términos utilizados. Debido a esta situación con la intención de clasificar las tecnologías de manera correcta se ha elaborado una normativa ISO que clasifica los vehículos según el grado de electrificación (Ros & Barrera, 2017). En la tabla 1, se presenta un resumen de los diferentes grados de electrificación, de los cuales serán explicados con más detalle a lo largo del capítulo aquellos que se consideren relevantes para el desarrollo de este estudio.

Clasificación de vehículos según el grado de electrificación				
Clasificación ISO	Nombre oficial	Características generales	Nomenclaturas habituales	Riesgos añadidos
μHEV (Micro Hybrid Electric Vehicle)	Vehículo microhíbrido	Incorpora placa solar fotovoltaica, sistema Stop & Start, KERS de alternador. Estos sistemas no pueden superar los 5 kW de potencia. No incorpora ningún sistema de tracción eléctrico.	Vehículo microhíbrido	Los sistemas añadidos, en general, no superan la tensión de seguridad (50 V) pero presentan riesgos añadidos.
mHEV (Mild Hybrid Electric Vehicle)	Vehículo híbrido «suave»	Incorpora alta tensión. Incorpora un sistema de tracción eléctrico que no supera los 15 kW de potencia. También incorpora KERS.	Vehículo híbrido en paralelo	Datos comunes en los mHEV, HEV, PHEV, REEV y FCEV.
HEV (Hybrid Electric Vehicle)	Vehículo híbrido	Incorpora alta tensión. Incorpora un sistema de tracción eléctrica que supera los 15 kW de potencia. También incorpora KERS.		Contienen elementos con alta tensión: baterías, cableado, motores, generadores, transformadores, etcétera.
PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	Vehículo híbrido enchufable	Es un vehículo híbrido (HEV) que además dispone de un sistema de carga exterior que permite conectarlo a la red eléctrica.	Vehículo híbrido enchufable	Contienen baterías de alta tensión y capacidad con químicas potencialmente peligrosas y con riesgo de explosión.
REEV (Range Extended Electric Vehicle)	Vehículo eléctrico de autonomía extendida	Incorpora alta tensión. Incorpora un sistema de tracción eléctrica que supera los 15 kW de potencia. También incorpora KERS. Son enchufables.	Vehículo híbrido en serie	Los vehículos FCEV incluyen además un depósito y una instalación de hidrógeno que presentan un alto riesgo de inflamación y explosión.
FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)	Vehículo de pila de combustible	Incorpora alta tensión. Incorpora un sistema de tracción eléctrica que supera los 15 kW de potencia. También incorpora KERS. Además de un depósito y una instalación de hidrógeno a alta presión.	Vehículo de hidrógeno	Los vehículos enchufables (PHEV, REEV y EV) disponen de un sistema de cableado para conectarse a la red eléctrica y que, por tanto, tiene una tensión peligrosa.
EV (Electric Vehicle)	Vehículo eléctrico	Incorpora alta tensión. Incorpora un sistema de tracción eléctrica que supone toda la tracción del vehículo. También incorpora KERS. Son enchufables.	Vehículo eléctrico	

Tabla 1. Clasificación de vehículos según el grado de electrificación

Fuente: Ros & Barrera

Selección de un automóvil híbrido.

A continuación, se presentan con más detalles las características de las diferentes categorías de vehículo eléctricos, según la compañía Simon Electric:

☐ **EV (Electric Vehicle)**

Los vehículos eléctricos que usan baterías, son llamados EV, y son automóviles completamente eléctricos. La propulsión en estos automóviles viene dada por los motores eléctricos, los cuales utilizan la energía que almacenan en su sistema de baterías interno, que comúnmente usan la tecnología de tipo iones de litio. Este sistema puede ser considerado completamente eléctrico y su principal característica es que es imprescindible conectarse a la red eléctrica para poder realizar la recarga de batería, y así tener autonomía suficiente.

☐ **HEV (Hybrid Electric Vehicle) - Vehículos híbridos eléctrico**

Los tipos de vehículos conocidos con el nombre de híbridos eléctricos son llamados híbridos convencionales o híbridos no enchufables. Se puede decir, que es una unión entre un vehículo eléctrico y uno convencional debido a que posee un motor de combustión interna (usa combustible: gasolina o diésel) y un motor eléctrico. La manera en que se recargan las baterías es utilizando la energía generada por el motor de combustible y aprovechando la energía recuperada cuando el vehículo realiza el frenado. El vehículo funciona de dos maneras: una en la que utiliza la energía eléctrica almacenada en las baterías y otra en la que utiliza el motor de combustión en caso de que no haya energía suficiente almacenada.

☐ **PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) - Vehículos híbridos eléctricos enchufables**

Los vehículos híbridos eléctricos enchufables son una variante de los vehículos híbridos convencionales. Poseen baterías de almacenamiento de energía que pueden ser recargadas usando energía eléctrica de la red. Esto hace que la autonomía del vehículo sea mayor en el modo totalmente eléctrico. Así como también, pueden funcionar de manera híbrida al igual que funcionan los híbridos no enchufables.

☐ **FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) - Vehículos eléctricos con pila de combustible**

Los vehículos eléctricos de pila de combustible, por sus siglas en inglés FCEV, son el tipo de vehículo eléctrico menos desarrollado en la actualidad, sin embargo, se están realizando más investigaciones en esta área. Este tipo de vehículo a diferencia del resto su fuente de energía proviene del hidrógeno y permite integrar esta de energía en el transporte. La pila de combustible es alimentada con hidrógeno para generar energía eléctrica, la cual es utilizada para alimentar el motor eléctrico que se encarga de impulsar el vehículo. Se debe destacar que el hidrógeno no genera emisiones, que hace que no se contamine el medio ambiente.

2.1.6. Distintivo ambiental

Según la Dirección General de Tráfico de España existen cuatro distintivos ambientales creados en función del impacto medioambiental de los vehículos y los mismos, clasificarán y graduarán el 50% del parque más eficiente. De mayor a menor eficiencia serían:



Etiqueta 0 emisiones, Azul: Identifica a los vehículos más eficientes. Tendrán derecho a esta etiqueta eléctricos de batería (BEV), eléctricos de autonomía extendida (REEV), eléctricos híbridos enchufables (PHEV) con una autonomía de 40 km o vehículos de pila de combustible.



Etiqueta Eco: Los siguientes en el escalón de eficiencia, se trata en su mayoría de vehículos híbridos, gas o ambos. Tendrán derecho a esta etiqueta eléctricos enchufables con autonomía inferior a 40 km, híbridos no enchufables (HEV), vehículos propulsados por gas natural y gas (GNC y GNL) o gas licuado del petróleo (GLP). Deben cumplir los criterios de la etiqueta C.



Etiqueta C, Verde: Vehículos de combustión interna que cumplen con las últimas emisiones EURO. Tendrán derecho a esta etiqueta turismos y furgonetas ligeras de gasolina matriculadas a partir de enero de 2006 y diésel a partir de septiembre de 2015. Vehículos de más de 8 plazas y pesados tanto de gasolina como diésel, matriculados desde 2014.



Etiqueta B, Amarilla: Vehículos de combustión interna que, si bien no cumplen con las últimas especificaciones de las emisiones EURO, sí que lo hacen con anteriores. Tendrán derecho a esta etiqueta turismos y furgonetas ligeras de gasolina matriculadas desde el 1 de enero de 2001 y diésel a partir de 2006. Vehículos de más de 8 plazas y pesados tanto de gasolina como diésel, matriculados desde 2006.

Estudio de Aplicación del Análisis Multicriterio para la toma de decisión en la
Selección de un automóvil híbrido.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

El resto de los vehículos, el 50% más contaminante, no tiene derecho a ningún tipo de distintivo al no cumplir los requisitos para ser etiquetado como vehículo limpio.

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo, se realiza una revisión bibliográfica acerca de los enfoques multicriterio. Para ello, en el primer apartado, se hace una breve introducción a la teoría de la decisión. Luego, en el segundo apartado, se explican los conceptos básicos de la teoría mencionada. Posteriormente, en el tercer y cuarto apartado, se definen dos conceptos que son vitales, la optimalidad paretiana y la tasa de intercambio. Por último, en los próximos apartados, se explican cada uno de los enfoques multicriterio.

3.1. Teoría de la decisión Multicriterio

3.1.1. Introducción a la Teoría de la decisión

Muchas veces cuando existen una variedad de alternativas surge el problema que no sabemos qué decisión tomar ante una situación importante. Es allí, cuando las personas se preguntan qué herramientas puedo utilizar para escoger la alternativa que más me convenga o se acerca más a las necesidades que quiero cubrir para poder obtener la mejor solución. En el primer capítulo del libro Teoría de la Decisión Multicriterio (Romero, 1993), se menciona al economista Milton Friedman, quien define que existen dos tipos de problemas: Los económicos y los tecnológicos. Cuando la decisión se basa en diversos criterios el problema es de tipo económico, mientras que si es un solo criterio es un problema del tipo tecnológico.

Cuando las personas van a una tienda de electrodomésticos en búsqueda de un televisor y desean comprar el que tenga mayor resolución nos encontraríamos en una situación del tipo de problema tecnológico, ya que la compra está basada en un solo criterio. De lo contrario, si las personas al dirigirse a la tienda basan su elección en distintos criterios tal como: El precio, la resolución del panel, HDMI u otras conexiones, tamaño, entre otros, entonces por el contrario sería un problema del tipo económico.

3.1.2. Conceptos Básicos

Para entender de manera clara y precisa el análisis multicriterio, es necesario introducir ciertas definiciones y conceptos explicados a continuación:

- **Atributo:** Son el rango de valores a los que se enfrentan en un problema. Dichos valores son independientes de las preferencias del centro decisor y deben poder ser expresados como una función matemática de las variables de decisión (Romero, 1993). Supongamos, que se quiere construir una casa, tenemos los valores del coste y el tamaño (m^2) que son utilizados para

Selección de un automóvil híbrido.

encontrar el mejor diseño para la vivienda. Dichos valores son los que se conocen como atributos, y las expresiones matemáticas quedan de la siguiente manera:

$$\text{COSTE} = f_1(x) = 10x_1^2 + 200x_1x_2$$

$$\text{TAMAÑO} = f_2(x) = 30x_1^2 + 200x_1x_2 \quad (1)$$

Donde x_1 = dimensión de los lados de la vivienda y x_2 = dimensión de la altura de la vivienda

- **Objetivos:** “Representan direcciones de mejora de los atributos. La mejora puede interpretarse en el sentido más del atributo mejor o bien menos del atributo mejor” (Romero, 1993), esto quiere decir, que pueden existir dos tipos de procesos: Maximización y Minimización, es decir, que los objetivos corresponden a la maximización o minimización de aquellas funciones correspondientes a los atributos, que expresan el deseo del centro decisor. En el ejemplo anterior, un objetivo podría ser minimizar el coste de la construcción de la vivienda, la expresión matemática queda representada de la siguiente manera:

$$\text{Min } f_1(x) = 10x_1^2 + 200x_1x_2 \text{ (COSTE)} \quad (2)$$

- **Meta:** El tercer concepto que es importante mencionar es el que se conoce como la meta. Primero que todo, es vital hacer referencia al concepto nivel de aspiración, el cual es el nivel aprobado como un logro para el atributo correspondiente. Haciendo la unión entre el atributo con un nivel de aspiración es lo que se obtiene como meta. (Romero, 1993). Siguiendo el ejemplo anterior de la construcción de una vivienda, si se quiere que el tamaño sea mayor o igual a $340m^2$, la expresión matemática para la meta sería la siguiente:

$$30x_1^2 + 200x_1x_2 \geq 340 \text{ (TAMAÑO)} \quad (3)$$

“Para afianzar las ideas podemos decir, por ejemplo, el beneficio es un atributo, maximizar el beneficio un objetivo y una meta es alcanzar un beneficio al menos igual a un determinado nivel de aspiración. Finalmente, el término criterio, se utiliza como un término general que engloba los tres conceptos precedentes. En otras palabras, los criterios constituyen los atributos, objetivos o metas que se consideran relevantes para un cierto problema decisional. Por consiguiente, la teoría de la decisión multicriterio constituye un marco general o paradigma decisional en el que subyacen diferentes atributos, objetivos o metas” (Romero, 1993).

Selección de un automóvil híbrido.

Para cerrar, debemos aclarar que existe una diferencia a nivel de conceptos, entre las metas y restricciones. Las metas son las que se desean alcanzar con un nivel de aspiración, mientras que las restricciones son los límites que se presentan en el problema para poder alcanzar la meta de una forma óptima. Siguiendo el ejemplo anterior, supongamos que solo se dispone de 500 metros cuadrados de terreno para construir, es decir, se tiene un límite disponible para la construcción. La expresión matemática de la restricción quedaría expresada de la siguiente manera:

$$30x_1^2 + 200x_1x_2 \leq 500 \text{ (Tamaño máximo de la vivienda)} \quad (4)$$

3.1.3. *Optimalidad paretiana*

“El economista italiano Wilfredo Pareto (1938), formuló una serie de principios, que han imperado en la sociedad, llamado Óptimo de Pareto. Según Millar y Meiners (1989) Pareto señala “que cualquier cambio de situación afectaría a una economía sin perjudicar a otra. Las situaciones son eficientes, si al haber un cambio de esa situación, se beneficia a alguno, sin perjudicar a otro”. Esto es, una asignación de recursos tal, que cuando se compara con cualquiera otra, las partes involucradas están por lo menos en iguales condiciones de lo que estaban antes y por lo menos una de ellas está mejor de lo que inicialmente estaba. El mismo autor manifiesta, que, “si aumenta la utilidad de un individuo, sin que disminuya la utilidad de otro, aumenta el bienestar social de los individuos (*ceteris paribus*)” (Blanco, 2014, pág. 223).

Según el Autor Carlos Romero, el concepto descrito anteriormente es vital para los distintos enfoques que se desarrollan en el paradigma multicriterio. Para avalar que las soluciones obtenidas son lógicas, la eficiencia paretiana es un requisito exigido. Que se define, como un conjunto de soluciones útiles, en donde no se haya otra solución factible o viable. Donde se obtenga una mejora en un atributo sin provocar un agravamiento en al menos otro de los atributos.

3.1.4. *Tasa de intercambio o trade off*

La optimalidad paretiana nos lleva a definir otro concepto, que es relevante para los enfoques multicriterio y se conoce como “tasa de intercambio o trade off”, que se define como la cantidad de logro que debe resignarse de un objetivo y así obtener el aumento unitario en otro, es decir, si tenemos dos soluciones óptimas definidas como x_1 y x_2 , donde $f_i(x_1)$ y $f_j(x_2)$ son las funciones para cada atributo. La expresión matemática es la siguiente:

$$T_{ij} = \frac{f_i(x_1) - f_j(x_2)}{f_j(x_1) - f_j(x_2)} \quad (5)$$

Con:

$$x_1 = x_{11} \dots x_{1n}$$

$$x_2 = x_{21} \dots x_{2n}$$

Las tasas de intercambio o trade off puede ser utilizada para dos funciones: a) Como indicador para la medición y análisis del coste de oportunidad de un criterio en comparación con el resto de los criterios que se tomen en cuenta b) Para el desarrollo de los métodos interactivos multicriterio (Romero, 1993).

3.1.5. Programación multiobjetivo

La programación multiobjetivo, también es conocida como optimización vectorial, la cual, es utilizada cuando en el contexto o situación existen múltiples objetivos que se quieren optimizar cumpliendo con cada una de las restricciones establecidas. Este enfoque, en vez de encontrar una sola solución eficiente establece un grupo de soluciones óptimas o Pareto óptimas. Dicho conjunto, se conoce como Frontera de Pareto, el cual, contiene todas las soluciones óptimas que no son dominadas. Una solución no es dominada, cuando esta es igual de eficiente que el resto de las soluciones en todos sus objetivos y estrictamente mejor que todas las soluciones con respecto al menos a un objetivo (Baesler, Moraga & Cornejo, 2008).

La estructura general de un programa multiobjetivo puede representarse de la siguiente manera:

$$\text{Eff } f(x) = [f_1(x), \dots, f_i(x), \dots, f_q(x)] \quad (6)$$

Sujeto a:

$$X \in F$$

donde:

Eff significa la búsqueda de soluciones eficientes o pareto óptimas.

$f_i(x)$ = Expresión matemática del atributo i-ésimo

X = Vector de variables de decisión

F = Conjunto de restricciones usualmente lineales que definen el conjunto de soluciones posibles

Selección de un automóvil híbrido.

Supongamos que una empresa de fabricación de ropa desea planificar su producción para el próximo mes. Existen dos productos: Las franelas de algodón y las franelas de cuero. Se representa x_1 y x_2 como el número de franelas de algodón y franelas de cuero diarias respectivamente. La capacidad diaria de producción para cada tipo de franela es de 20 unidades de algodón y 10 unidades de cuero. Cada pieza manufacturada necesita 1 persona y la empresa cuenta con 50 empleados. El margen bruto (ventas menos costes variables) son de 5 u.m por cada franela de algodón y 10 u.m por cada franela de cuero. Los costes fijos son de 100 u.m al día, y la empresa quisiera al menos cubrirlos. Además, la producción de cada una de las franelas afecta al medio ambiente emitiendo 5 gramos y 4 gramos de CO₂ al día por cada franela producida de algodón y de cuero respectivamente. El objetivo de la empresa es maximizar el margen bruto y minimizar las emisiones de CO₂.

A continuación, se presenta la estructura matemática del modelo multiobjetivo que en este caso es bi objetivo:

$$\text{Eff } f(x) = [f_1(x), f_2(x)]$$

Donde:

$$f_1(x) = 5x_1 + 10x_2$$

$$f_2(x) = -5x_1 - 4x_2$$

Sujeto a:

Capacidades de producción

$$x_1 \leq 20$$

$$x_2 \leq 10$$

Empleo

$$x_1 + x_2 \leq 50 \text{ (empleados)}$$

Margen bruto

$$5x_1 + 10x_2 \geq 100 \quad (7)$$

Se puede observar que $f_1(x)$ y $f_2(x)$, son las expresiones matemáticas para los atributos margen bruto y emisiones de CO₂. Con objeto de colocar todos los objetivos en un sentido maximizador se ha puesto

el signo menos a todos los coeficientes en el segundo objetivo. Debido a que en el ejemplo solo existen dos variables de decisión y dos objetivos, se puede resolver de manera gráfica.

El conjunto de posibles soluciones que corresponden a las restricciones de la estructura (7) se puede ver reflejado en el siguiente gráfico (Ver figura 16) a continuación; Donde el eje de las abscisas representa las unidades de franelas de algodón al día (unidades/día) y el eje de las ordenadas las unidades de franelas de cuero al día (unidades/día). El gráfico se obtuvo con el programa de calculadora gráfica GeoGebra:

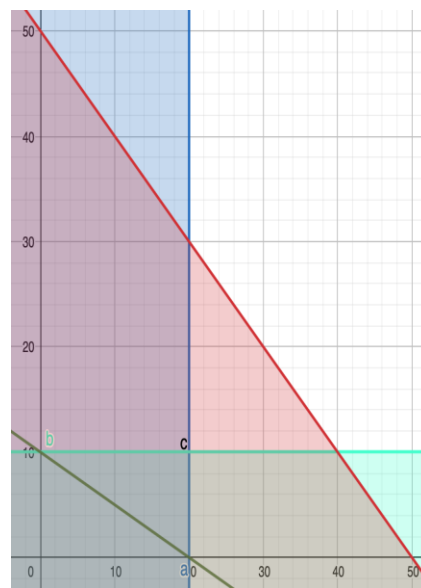


Figura 16. Conjunto de soluciones posibles en el espacio de las variables de decisión.

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en el gráfico (Ver figura 16) que la figura formada por los puntos extremos abc representan el conjunto de posibles soluciones que corresponden a las restricciones del modelo 7. Los valores alcanzados en cada punto por cada uno de los dos objetivos considerados están en la siguiente tabla (Ver tabla 2) y se hace un ejemplo de cómo calcularlos para el punto a:

$$f_1(x) = 5x + 10y = 5 \times 20 + 10 \times 0 = 100$$

$$f_2(x) = 5x + 4y = 5 \times 20 + 4 \times 0 = 100 \quad (8)$$

	Variables de decisión		Funciones objetivas	
Puntos extremos	Unidades de franelas de algodón (unidades/día)	Unidades de franelas de cuero (unidades/día)	Margen Bruto (u.m/ día)	Emisiones de CO2 (gramos/ día)
a	20	0	100	100
b	0	10	100	40
c	20	10	200	140

Tabla 2. Coordenadas de los puntos extremos eficientes.

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, dichos valores alcanzados por los atributos en cada uno de los puntos extremos hacen que se generen nuevamente otros puntos extremos como se ve reflejado en la gráfica (Ver figura 17). Donde el eje de las abscisas representa el Margen Bruto (u.m/ día) y el eje de las ordenadas las emisiones de CO2 (gramos/ día). Se puede observar que el punto a corresponde al punto a' en el gráfico de la figura 2, a través de los valores $f_1(x)$ y $f_2(x)$. Para los puntos b y c ocurre lo mismo que en el caso del punto a.

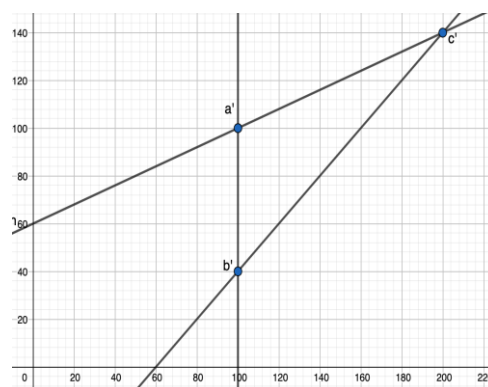


Figura 17. Conjunto eficiente en el espacio de los objetivos.

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la figura 17, se deduce que el polígono que une a los puntos a', b' y c', representa el conjunto eficiente para el problema en cuestión. Los puntos que no pertenecen a la frontera a'b'c' son ineficientes, pues ofrecen menos margen bruto e igual emisión de CO2 o igual margen bruto y una mayor

Selección de un automóvil híbrido.

emisión de CO₂ que los puntos en la frontera a'b'c'. Finalmente, en el ejemplo el conjunto de puntos Pareto óptimos viene dado por la frontera abc en el espacio de las variables de decisión o por la frontera a'b'c' en el espacio de los objetivos. Las pendientes de los segmentos, que corresponden a la frontera representan las tasas de intercambio entre los atributos que se están tomando en cuenta. Así, la tasa de intercambio entre el margen bruto y las emisiones de CO₂ a lo largo del segmento a'c' según la definición es:

$$T_{A'C'} = \frac{200-100}{140-100} = 2.5 \quad (9)$$

La expresión (9) significa que, a lo largo del segmento a'c' una reducción de 1 gramo de las emisiones de CO₂, hace que se disminuya 2.5 u.m del margen bruto, lo que quiere decir que el coste unitario de oportunidad de las emisiones de CO₂ se estima en 2.5 u.m/ día.

□ La Matriz de pago en la programación multiobjetivo

Una vez ya hemos definido a lo que se refiere una programación multiobjetivo, lo primero que se debe realizar para aplicarla en un problema real es conseguir la matriz de pago. La cual, permite calcular el nivel de conflicto existente entre los diferentes objetivos que se tomen en cuenta. (Cabello, 2017). Para obtener la matriz de pago, se hace la mejora de cada objetivo por separado uno del otro. Luego, se realiza el cálculo de los valores que lograron el resto de los objetivos en cada solución óptima. Así, se consigue la matriz cuadrada, la cual el tamaño encaja con el número de objetivos (Romero, 1993). En el ejemplo anterior para conseguir la matriz de pago se tiene que resolver el siguiente programa lineal:

$$\text{Max } f_1 = 5x_1 + 10x_2 \quad (10)$$

Sujeto a:

Conjunto de restricciones del modelo (7)

Al resolver el programa lineal del modelo (10) se obtiene como solución óptima $x_1 = 20$ y $x_2 = 10$ unidades de franelas, $f_1 = 200$ u.n/ día y $f_2 = 140$ gramos/ día. Por lo tanto, los valores que se obtuvieron de f_1 y f_2 son los elementos de la primera fila de la matriz de pagos (Ver Tabla 2) y se puede

Selección de un automóvil híbrido.

observar que dichos valores corresponden a las coordenadas del punto extremo eficiente c' . Ahora bien, para obtener la segunda fila de la matriz de pago se tiene que resolver el siguiente programa lineal:

$$\text{Min } f_2 = 5x_1 + 4x_2 \quad (11)$$

Sujeto a:

Conjunto de restricciones del modelo (7)

Resolviendo el problema lineal (11) se obtiene como solución óptima $x_1 = 0$ y $x_2 = 10$ unidades de franelas, $f_1 = 100$ u.n./ día y $f_2 = 40$ gramos/ día. De esta manera, los valores que se obtuvieron de f_1 y f_2 , son los elementos de la segunda fila de la matriz de pagos (Ver tabla 3). Se puede observar que dichos valores corresponden a las coordenadas del punto extremo eficiente b' (Ver figura 17).

	Margen Bruto (u.m día)	Emisiones de CO2 (gramos/día)
Margen Bruto	200	140
Emisiones de CO2	100	40

Tabla 3. Matriz de pagos.

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se indicó anteriormente, la matriz de pago sirve para poder observar los conflictos existentes entre los objetivos. Asimismo, se puede ver que, en el ejemplo, existe un conflicto entre los dos objetivos: Margen bruto y emisiones de CO2. Para alcanzar un margen bruto de 200 u.m/ día, las emisiones sobrepasan 3.5 veces a los que debería ser su nivel mínimo. Mientras que para alcanzar el nivel mínimo de emisiones el margen bruto, es la mitad de lo que debería ser el máximo.

Aparte de, se debe observar que los elementos de la diagonal principal de la matriz de pago suelen llamarse punto ideal, debido a que es la solución en donde todos los objetivos logran alcanzar su valor óptimo. En el ejemplo, el punto ideal es alcanzar un margen bruto de 200 u.m/ día con unas emisiones de CO2 de 40 gramos al día. Normalmente, en los problemas de decisiones reales los objetivos siempre entran en conflicto por lo que alcanzar es punto ideal es imposible. Por otro lado, es importante observar que los peores elementos en la matriz de pago son conocidos como punto anti ideal. Dicho elemento

Selección de un automóvil híbrido.

será el máximo de la columna si el objetivo correspondiente es de minimización y será el elemento mínimo de la columna si se quiere maximizar el objetivo correspondiente.

❑ El Método de las restricciones

Romero (1993) hace mención de Marglin (1967), que demostró que, si en un problema multiobjetivo uno de los objetivos se optimiza, este se trata como una función y el resto de los objetivos se introducen al conjunto de restricciones. Esto consiste en optimizar un solo objetivo del total de todos. Así, este resulta como función objetivo, mientras que el resto serán incluidos en el conjunto de restricciones como restricciones paramétricas. De esta manera, para cada conjunto de valores que se asigne al vector de términos independientes o términos de la derecha, se obtiene un punto eficiente interior o extremo. En el caso de un problema de decisión, que los objetivos sean a minimizar, la expresión matemática del tipo paramétrico queda de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } f_i(x)$$

Sujeto a:

$$X \in F$$

$$f_j(x) \geq L_j \quad j = 1, 2, \dots \quad (12)$$

Donde:

F: Se refiere al conjunto de soluciones posibles.

L_j : Términos independientes del objetivo incluido como restricciones que a través de variaciones paramétricas se van a ir generando el conjunto eficiente

❑ Método de las ponderaciones

De los diferentes enfoques para obtener el conjunto de soluciones óptimas, este fue el primero en desarrollarse, el cual fue propuesto por Zadeh (1963). Consiste en que cada objetivo es asociado con un peso o coeficiente de ponderación no negativo, y posteriormente se agregan todos los objetivos. Al realizar la optimización de la función agregada y ponderada se obtendrá para cada conjunto de pesos

Selección de un automóvil híbrido.

un punto extremo eficiente. Así, en un problema de decisión con q objetivos a maximizar, al aplicar el método de las ponderaciones conlleva al siguiente programa matemático de tipo para métrico,

$$\text{Minimizar } W_1 f_1(x) + W_2 f_2(x) + \dots + W_q f_q(x)$$

Sujeto a:

$$X \in F$$

$$W \geq 0 \quad (13)$$

Donde:

F: Se refiere al conjunto de soluciones posibles.

W: Se refiere a los pesos asignados a los objetivos

3.1.6. Programación compromiso

La programación compromiso desarrollada por Yu (1973) y Zeleny (1974), es una técnica multicriterio basada en el concepto de punto ideal. Dicho punto, se toma como referencia para saber cuándo los objetivos alcanzan su valor óptimo. Así, ir disminuyendo el conjunto llamado Pareto óptimas. Esta técnica multicriterio, está basada en el axioma de Zeleny (1973), que establece, dado dos resultados posibles dentro de los objetivos, se elegirá el que se encuentre más cercano al punto ideal (Romero, 1993).

A estos puntos que se encuentran a menor distancia del punto ideal, los conocemos como puntos compromisos, y a la totalidad de ellos el conjunto compromiso. El concepto distancia es indispensable para el desarrollo de este enfoque multicriterio. Existen diferentes definiciones, pero la más popular es la distancia euclídea, que es la longitud que existe entre un punto A (x_1, y_1) y un punto B (x_2, y_2) , la expresión matemática es la siguiente:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (14)$$

El autor Carlos Romero (1993) afirma en su libro que, unos años atrás, varios matemáticos le dieron la generalización al concepto distancia y surgió la idea de la familia de métricas; A continuación, la expresión matemática.

$$L_p = \left[\sum_{j=1}^n |x_j^1 - x_j^2|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (15)$$

En la expresión (15), el parámetro “p” puede estar comprendido entre 1 y ∞ , donde: L_1 , viene representada por la distancia más larga, conocida como la distancia Manhattan, L_2 sería la que se conoce como distancia euclídea de la expresión (14) y L_∞ , es conocida como la distancia “Chebysev”, que representa el mayor valor absoluto entre la diferencia de las dos cantidades que están en los corchetes.

Ahora bien, para determinar las soluciones compromisos, se aplica el axioma de Zeleny mencionado anteriormente, el cual se formula de la siguiente manera:

$$f^1 P f^2 \Leftrightarrow D(f^1) < D(f^2)$$

$$f^2 P f^1 \Leftrightarrow D(f^2) < D(f^1)$$

$$f^1 I f^2 \Leftrightarrow D(f^1) = D(f^2)$$

La P e I representan las relaciones de preferencia e indiferencia y $D(f^i)$ es la distancia determinada por alguna métrica entre la (f^i) y el que corresponde al punto ideal. Como se expuso previamente, el punto ideal es inalcanzable. Así que, se debe de determinar las soluciones compromiso. Para ello, lo primero que se debe hacer es, determinar el grado de proximidad h_j entre el objetivo j-ésimo y su valor ideal f_j^* , de la siguiente manera:

$$h_j = |f_j^* - f_j(x)| \quad (16)$$

Una vez determinados los diferentes grados de proximidad h_j , se procede a normalizar. La normalización se debe realizar, ya que generalmente los objetivos se encuentran en unidades de mediciones distintas, lo que hace necesario realizar dicha normalización. De lo contrario, el resultado de la suma de los grados de proximidad no tendría sentido. A continuación, se presenta alguna de las posibles maneras de homogeneizar los objetivos:

$$h_j = \frac{|f_j^* - f_j(x)|}{|f_j^* - f_{*j}(x)|} \quad (17)$$

Donde h_j representa el grado de proximidad del objetivo j-ésimo y f_{*j} es el objetivo anti-ideal, refiriéndose a este con el enfoque que se definió previamente. Los valores de los grados de proximidad normalizados oscilan entre 0 y 1. Cuando el objetivo logra alcanzar su valor ideal, el grado de proximidad será “cero”. Mientras que, si el objetivo tiene un valor igual al anti ideal, el grado de proximidad será igual

Selección de un automóvil híbrido.

a “uno”. Ahora si W_j , se interpreta como las preferencias que el centro decisor asocia a la diferencia que existe entre la realización del objetivo j-ésimo y su ideal, la programación compromiso que se refiere a encontrar las soluciones óptimas más próximas al ideal, se convierte en el siguiente problema de optimización:

$$\text{Min } L_p = \left[\sum_{j=1}^n W_j^p \left| \frac{f_j^* - f_j(x)}{f_j^* - f_{*j}(x)} \right|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (18)$$

Sujeto a:

$$x \in F$$

Se puede observar en la ecuación (18) que $f_j^* \geq f_j(x)$ para cualquier objetivo, esto se debe a que, f_j^* pertenece a una componente del vector ideal. En consecuencia, no son necesarios los corchetes y pueden ser eliminados. Para la métrica $p=1$, la mejor solución óptima o también llamado punto más cercano al ideal, se puede encontrar desarrollando la siguiente programación lineal:

$$\text{Min } L_1 = \sum_{j=1}^n W_j \frac{f_j^* - f_j(x)}{f_j^* - f_{*j}} \quad (19)$$

Sujeto a:

$$x \in F$$

Mientras que para la métrica $p = \infty$, se quiere minimizar la máxima desviación entre las desviaciones individuales. Para poder calcular la mejor solución compromiso para dicha métrica, se puede utilizar la siguiente programación lineal:

$$\text{Min } L_\infty = h$$

s.a:

$$x \in F$$

$$W_1 \frac{f_1^* - f_1(x)}{f_1^* - f_{*1}} \leq h$$

$$W_i \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^* - f_{*i}} \leq h \quad (20)$$

Selección de un automóvil híbrido.

En el modelo (20), h representa la desviación más grande.

3.1.7. Programación por metas

La programación por metas, según el libro de Carlos Romero (1993), es una metodología utilizada para resolver problemas de programación multiobjetivo. Los cuales son bastante complejos y requieren de una formulación de modelos con un cierto tamaño. En el año 1955, surge por primera vez la introducción de la misma en un artículo de Charnes, Cooper & Ferguson. Donde, se quería desarrollar una metodología con el objetivo de determinar los salarios de los empleados de la empresa General Electric. Sin embargo, en el libro *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming* de Charnes & Cooper, fue donde desarrollaron el concepto y le dieron el nombre de programación por metas. Hasta mediados de los años 70, se realizaron varios trabajos de programación por meta, entre los más importantes destaca Ignizio 1976. Que logró adaptar el concepto de Programación por Metas para obtener soluciones en un problema que conllevaba la organización del sistema de antenas Saturno/Apolo. A pesar de dichos trabajos, era muy poca las aplicaciones de la programación por meta. Aunque, desde mediados del año 70 hubo una gran cantidad de trabajos referidos y que desarrollaron la programación por meta. Lo cual, puede asegurarse que es uno de los métodos más utilizados en el enfoque multicriterio y más popular en el área de los métodos de investigación operativa.

Para desarrollar dicha metodología, lo primero que hay que hacer es, definir los atributos que son de gran importancia para el problema que se quiere resolver. Posteriormente, es necesario determinar el nivel de aspiración para cada atributo. Por último, se establece una conexión entre el atributo y el nivel de aspiración, a través de las variables de desviación positiva y negativa, quedando su fórmula de la siguiente manera;

$$f_i(x) + n_i - p_i = t_i \quad (21)$$

En el modelo (21), $f_i(x)$ representa la expresión matemática del atributo i -ésimo, t_i su nivel de aspiración, n_i la variable de desviación negativa y p_i la variable de desviación positiva. Es importante hacer una recapitulación acerca de la variable de desviación negativa y positiva. Que representan la cuantificación de la falta de logro de una meta con respecto al nivel de aspiración y el sobrante de logro de una meta con respecto a su nivel de aspiración respectivamente. En el ejemplo anterior del modelo (7), se quiere maximizar el margen bruto de la empresa a 400 euros, lo transformamos a una meta fijando el nivel de aspiración en 400 euros. En este caso la metra queda de la siguiente manera;

$$5x_1 + 10x_2 + n_1 - p_1 = 400 \quad (22)$$

Selección de un automóvil híbrido.

Si la solución fuera $x_1 = 50$ y $x_2 = 30$, implicaría $550 + n_1 - p_1 = 400 \Rightarrow n_1=0, p_1=150$. Hay 150 euros en exceso con respecto a su nivel de inspiración. Mientras que, si la solución fuera $x_1 = 10$ y $x_2 = 10$, implicaría $150 + n_1 - p_1 = 400 \Rightarrow n_1=250, p_1=0$. Han quedado 250 euros por debajo del nivel de aspiración. A diferencia de, si la solución fuera $x_1 = 20$ y $x_2 = 30$, entonces $400 + n_1 - p_1 = 400 \Rightarrow n_1=0, p_1=0$. El objetivo de maximizar el margen bruto ha alcanzado exactamente su nivel de aspiración.

Se debe introducir un nuevo concepto llamado variable de desviación no deseada. Una variable es no deseada, cuando al centro decisor le beneficia que la variable que se está estudiando, alcance su valor más pequeño o cero. Cuando hay un problema del tipo maximizar, la variable no deseada que se va a querer minimizar es aquella de desviación negativa. Por el contrario, si el problema es de minimizar, la variable deseada que se va a querer disminuir es aquella de desviación positiva. Por último, si se quiere alcanzar el nivel exacto de aspiración, la variable de desviación negativa y positiva, son variables no deseadas que se quieren minimizar.

Para la continuación del modelo de programación por metas, se tiene que minimizar las variables de decisión no deseadas. Para poder realizar la minimización de las variables de desviación no deseadas, existen diferentes métodos; A continuación, se hace una breve explicación de cada uno de ellos;

El primero, se conoce como programación por metas ponderadas, el cual consiste en minimizar la suma de las variables de desviación no deseadas. Hay que tomar en cuenta que no todas las variables de decisión no deseadas se encuentran en las mismas unidades, lo cual nos daría un resultado sin sentido. Para evitar esto, se minimiza una suma de desviaciones porcentuales. Sin embargo, aunque en la suma de los porcentajes no hay ningún problema de homogeneidad, en el modelo hay que ponderar el nivel de importancia de cada meta para el centro decisor. Esto se debe, a que no necesariamente todas las metas tienen la misma importancia. Para ello, se sustituyen los coeficientes W en la expresión. A continuación, se ilustra un ejemplo del caso del modelo (7), paso a paso de cómo sería una formulación completa como modelo de programación por metas. Para el desarrollo del ejercicio, se asocia al atributo margen bruto un nivel de inspiración de 400 euros. A los demás atributos, se le asocia como nivel de aspiración, el termino independiente de la correspondiente restricción. Excepto, para el atributo emisiones de CO₂, al que se le asocia un nivel de aspiración de 200 gramos. De esta manera tenemos una lista de metas (Romero, 1993):

$$g_1: 5x_1 + 10x_2 + n_1 - p_1 = 400 \text{ (Margen bruto)}$$

$$g_2: 5x_1 + 4x_2 + n_2 - p_2 = 200 \text{ (Emisiones de CO}_2\text{)}$$

$$g_3: x_1 + n_3 - p_3 = 20 \text{ (Capacidad de produccion)}$$

$$\begin{aligned} g_4: \quad & x_2 + n_4 - p_4 = 200 \text{ (Capacidad de produccion)} \\ g_5: \quad & x_1 + x_2 + n_5 - p_5 = 50 \text{ (Empleo)} \end{aligned} \quad (23)$$

Teniendo claro cuáles son las metas. Seguidamente, se identifican las variables de decisión no deseadas. En este caso, para la meta g_1 , la variable de decisión no deseada es n_1 , ya que se desea alcanzar un margen bruto lo más grande posible (a ser posible mayor de 400 euros). Para la meta g_2 , la variable no deseada de decisión es p_2 , ya que se desea minimizar las emisiones lo más posible (a ser posible menos de 200 gramos). Para las metas 3 y 4 el centro decisor no desea superar las capacidades de producción, ya que implica turnos extraordinarios. En consecuencia, las variables p_3 y p_4 son no deseadas. Finalmente, se supone que el centro decisor no le interesa ni quedarse corto ni largo con la mano de obra, en este caso n_5 y p_5 son variables de decisión no deseadas. Así, para el ejemplo se minimiza la siguiente suma:

$$\text{MIN } n_1 + p_2 + p_3 + p_4 + n_5 + p_5 \quad (24)$$

La expresión (24) no tiene significado y no se utiliza para expresar las preferencias del centro decisor. Primero, las variables están en unidades diferentes por lo que su suma no tiene significado alguno. Además, como los valores absolutos de los niveles de aspiración son muy diferentes, la minimización de (24), puede ocasionar sesgos en las soluciones hacia un mayor cumplimiento de las metas con niveles de aspiración elevados. Para evitar estos riesgos, se procede a minimizar una suma de desviaciones porcentuales por lo que la expresión (24) pasa a ser la siguiente:

$$\text{MIN } \frac{n_1}{400} + \frac{p_2}{200} + \frac{p_3}{20} + \frac{p_4}{200} + \frac{n_5 + p_5}{50} \quad (25)$$

A pesar de que la expresión (25) no presenta problemas de homogeneidad. Al ser normalizada elimina cualquier sesgo hacia el cumplimiento de metas con niveles de aspiración elevados. La expresión (25) todavía no es considerada un subrogado de las preferencias del centro decisor. Implícitamente el centro decisor da la misma importancia al logro de todas las metas, lo cual no tiene que porque ser así. Para eliminar este problema, el centro decisor asigna un peso para la realización de cada meta. Quedando la expresión (25) de la siguiente manera:

$$\text{MIN } W_1 \frac{n_1}{400} + W_2 \frac{p_2}{200} + W_3 \frac{p_3}{20} + W_4 \frac{p_4}{200} + W_5 \frac{n_5 + p_5}{50} \quad (26)$$

Por último, se minimiza la suma ponderada de las variables de decisión no deseadas, lo que se conoce como programación por metas ponderadas. El modelo de metas ponderadas para el ejemplo queda formulado de la siguiente manera:

$$\text{MIN } W_1 \frac{n_1}{400} + W_2 \frac{p_2}{200} + W_3 \frac{p_3}{20} + W_4 \frac{p_4}{200} + W_5 \frac{n_5 + p_5}{50}$$

s.a

$$\begin{aligned} g_1: 5x_1 + 10x_2 + n_1 - p_1 &= 400 \text{ (Margen bruto)} \\ g_2: 5x_1 + 4x_2 + n_2 - p_2 &= 200 \text{ (Emisiones de CO2)} \\ g_3: x_1 + n_3 - p_3 &= 20 \text{ (Capacidad de produccion)} \\ g_4: x_2 + n_4 - p_4 &= 200 \text{ (Capacidad de produccion)} \\ g_5: x_1 + x_2 + n_5 - p_5 &= 50 \text{ (Empleo)} \end{aligned} \quad (27)$$

Ahora bien, existe otra ramificación de programación por metas que conocemos como programación por metas lexicográficas. La cual, consiste en que el centro decisor ordena de manera decreciente la prioridad Q_i que le da a cada meta. Hay ciertas metas que estarán situadas en un nivel alto de prioridad, y otras en niveles más bajos de prioridad. Mientras más alto sea el nivel de prioridad, se tratará de satisfacer en lo más posible. A Diferencia que, la de niveles inferiores se considerará la posible satisfacción. Con la finalidad de ilustrar la estructura de este enfoque, supongamos que, para el modelo (27), el centro decisor tiene como primera prioridad Q_1 las metas g_3 y g_4 . Estas, son las primeras metas que se deben alcanzar de manera absoluta y excluyente. Que garantizan que no se sobrepase las capacidades de producción para la fábrica. La siguiente Q_2 está formado por la meta g_2 , que pretende que el plan de fabricación de las camisas no supere los 200 gramos de emisiones de CO2. La siguiente prioridad en orden de importancia Q_3 está formada por la meta g_1 , donde se quiere alcanzar un margen bruto de al menos 400 euros. Y la última prioridad Q_4 , esta formada por la meta g_5 , donde se quiere utilizar exactamente la mano de obra disponible (Romero, 1993). El proceso de minimización lexicográfica de las variables de desviación no deseadas queda reflejado en el siguiente vector:

$$\text{Lex min } a = [(p_3 + p_4), (p_2), (n_1), (n_5 + p_5)] \quad (28)$$

El vector (28) representa la función logro, es decir, reemplaza a la función objetivo. Cada una de las componentes de la función logro, representa las variables de decisiones no deseadas que se van a minimizar. De esta manera, se alcanza el objetivo de la máxima realización de cada meta, de acuerdo a las prioridades del centro decisor. La función logro queda representada de la siguiente manera:

$$\text{Lex min } a = [h_1(n, p), h_2(n, p), \dots, h_k(n, p)] \quad (29)$$

o

de forma abreviada:

$$\text{Lex min } a = [a_1, a_2, \dots, a_k]$$

Selección de un automóvil híbrido.

$a_k = h(n, p)$ representa la función de las variables de decisión no deseadas. La minimización lexicográfica del vector (29) lleva a minimizar ordenadamente sus componentes. Primero, se encuentra el valor más pequeño de la componente a_1 . Luego, se busca el valor más pequeño de la componente a_2 , compatible con el valor obtenido previamente de a_1 , y así sucesivamente. Finalmente, combinando la función de logro del modelo (28) y las metas del modelo (23) se obtiene el modelo por metas lexicográficas:

$$\text{Lex min } a = [(p_3 + p_4), (p_2), (n_1), (n_5 + p_5)]$$

s.a

$$Q_3 \text{ } g_1: 5x_1 + 10x_2 + n_1 - p_1 = 400 \text{ (Margen bruto)}$$

$$Q_2 \text{ } g_2: 5x_1 + 4x_2 + n_2 - p_2 = 200 \text{ (Emisiones de CO2)}$$

$$Q_1 \text{ } g_3: x_1 + n_3 - p_3 = 20 \text{ (Capacidad de producción)}$$

$$Q_1 \text{ } g_4: x_2 + n_4 - p_4 = 200 \text{ (Capacidad de producción)}$$

$$Q_4 \text{ } g_5: x_1 + x_2 + n_5 - p_5 = 50 \text{ (Empleo)} \quad (30)$$

Esta programación con metas lexicográficas se puede resolver con distintos métodos que serán explicados más adelante.

3.1.8. Enfoques Interactivos Multicriterio

Existen otros enfoques multicriterio los cuales se conocen como interactivos. Donde, lo primero que se tiene que saber, es que, en este tipo de modelos existen 3 entidades que participan en el proceso; El centro decisor, el analista y el modelo. En donde, el analista, es aquel que actúa de intermediario entre el centro decisor y el modelo. Este tipo de enfoques funcionan de la siguiente manera, el analista presenta una solución inicial, la cual se le facilita al centro decisor para su evaluación. Cabe destacar que antes de presentar la solución inicial no se pide información al centro decisor acerca de sus preferencias, si no después de presentar la solución. Al presentar el centro decisor sus preferencias relativas, el analista las introduce en el modelo para dar la nueva propuesta de solución. Así, sucesivamente hasta llegar a una solución que sea suficientemente buena para el centro decisor. En estos enfoques, no es necesario hacer referencia o ser explícito acerca de supuestos sobre la estructura general del centro decisor. Por ejemplo, considerar que minimizar los costos es 2 veces más importante que maximizar las ganancias, este tipo de información se va obteniendo a medida que el centro decisor mantiene una comunicación de manera interactiva con el modelo computarizado (Romero, 1993).

Selección de un automóvil híbrido.

Existen diferentes maneras de clasificar los métodos interactivos: Basado en el tipo de información que se solicita al centro decisor durante el proceso interactivo. Tal como, información acerca de las tasas de intercambio que existe entre los objetivos y metas. Aunque este tipo de interacciones existe mayoritariamente, son muy difíciles de llevar a cabo. Debido a que los centros decisores se les hace complicado dar con exactitud de manera cuantitativa cuáles son las tasas de intercambio. Por otro lado, al llevar a cabo este tipo de comunicaciones, implica hacer cálculos matemáticos que son muy complejos. Otra clasificación de los métodos interactivos es: Cuando el centro decisor se le muestran las diferentes tasas de intercambio y deciden si aceptarlo o no. Por último, existe otro tipo, donde simplemente se le pregunta al centro decisor, acerca de aceptar o rechazar la solución propuesta, sin previamente haberle preguntado sobre las tasas de intercambio. En caso de, el centro decisor no estar de acuerdo con la solución eficiente, deberá señalar qué objetivos deberían mejorar su eficiencia (Romero, 1993).

□ El método STEM

El método STEM desarrollado por Benayoun en el año 1971, conocido como uno de los métodos más antiguo y utilizado en la práctica. Tiene el último tipo de estructura de comunicación, que se hizo referencia en el párrafo anterior. STEM funciona en dos etapas diferentes: a) una de cálculo b) otra de decisión. En la primera, se realizan los cálculos para obtener la matriz de pago y en la segunda, ocurre realmente la interacción y comunicación entre el analista y el centro decisor. En la primera etapa, donde se calculan las matrices de pagos, se obtiene el punto ideal y anti ideal de cada objetivo. Consecuentemente se consigue la solución inicial que se encuentra más cercana al punto ideal en sentido minimax para la métrica $p = \infty$ (donde se busca la minimización de la máxima desviación entre todas las desviaciones posibles). Dicha solución se encontrará a partir del programa lineal a continuación:

$$\begin{aligned}
 &\text{Min } d \\
 &\text{s.a} \\
 &W_j[f_j^* - f_j(x)] \leq d \quad j = 1, 2, \dots, q \\
 &X \in F
 \end{aligned} \tag{31}$$

Para normalizar los objetivos se propone hacerlo con arreglo a los siguientes pesos:

$$W = \frac{v_j}{\sum_{j=1}^q v_j} \tag{32}$$

Donde:

$$V_j = \frac{f_j^* - f_j}{f_j^*} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sum_{k=1}^m c_{kj}^2}} \text{ En caso de que el objetivo } j\text{-ésimo se quiera maximizar}$$

o

$$V_j = \frac{f_j - f_j^*}{f_j^*} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sum_{k=1}^m c_{kj}^2}} \text{ En caso de que el objetivo } j\text{-ésimo se quiera minimizar} \quad (33)$$

Es importante tomar en cuenta ciertos detalles de los modelos. Primero, c_{kj}^2 representa los coeficientes del objetivo j -ésimo, los pesos no tienen nada que ver con las preferencias del centro decisor, ya que son factores normalizadores. Por otro lado, los primeros términos de la expresión (33), el objetivo es dar un mayor peso a los objetivos que se desvían más de la solución óptima. Mientras que, los segundos términos de la expresión (33), desean normalizar los diferentes objetivos de acuerdo con la norma euclidiana para la métrica $p=2$.

La segunda etapa de decisión se inicia en el momento que el analista le presenta al centro decisor la solución obtenida por el modelo (31). De esta manera, el centro decisor realiza una comparación entre dicha solución y la que pertenece al punto ideal. En algunos casos, el centro decisor acepta la primera propuesta. De lo contrario, el centro decisor deberá mostrar al analista, qué atributos pueden ser empeorados con el objetivo de mejorar el resto.

❑ El método de Zionts & Wallenius

Otro método interactivo y bastante popular, es el llamado Zion & Wallenius, el cual fue propuesto en 1976 por Stanley Zionts y Jyrky Wallenius. Este tipo de método a diferencia del STEM, su manera de comunicarse con el centro decisor es diferente. En este modelo, se le muestran las tasas de intercambio al centro decisor y ellos deciden si aceptarlo o no. Al igual que STEM, este segundo método tiene dos fases: La del cálculo y la de decisión. La primera fase, reside en solucionar una programación lineal. En la cual, la función objetivo, está constituida por todos aquellos objetivos que serán tomados en cuenta para el análisis del problema que se quiere solventar. En cuanto a las restricciones, se agregan todos los objetivos como restricciones adicionales en forma de igualdades. Las cuales, son vitales en el método a desarrollar, ya que posibilita crear los vectores de tasas de intercambio. Que se muestran al centro decisor para que las evalúen. A continuación, se presenta un ejemplo, de cómo sería la resolución de un problema a través del método Zion & Wallenius, extraído del libro teoría de la decisión de Carlos Romero; Se considera una agencia de planificación responsable del desarrollo de un pequeño municipio rural con 1000 hectáreas de suelo cultivable. Se puede producir 3 tipos de cosechas: A B Y C. La estructura del modelo decisional puede esquematizarse de la siguiente manera:

$$\text{Eff } f(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x)]$$

Donde:

$$f_1(x) = 1000x_1 - 3000x_2 - 1500x_3$$

$$f_2(x) = 500x_1 - 200x_2 - 200x_3$$

$$f_3(x) = -6000x_1 - 8000x_2 - 3000x_3$$

s.a

$$X_1 + X_2 + X_3 \leq 1000$$

$$4000x_1 + 5000x_2 + 2000x_3 \leq 4.200.000$$

$$-x_1 + x_2 + x_3 \leq 0$$

$$1000x_1 + 3000x_2 + 1500x_3 \geq 1.000.000$$

$$500x_1 + 200x_2 + 200x_3 \geq 350.000 \quad (34)$$

Donde: X_1 = Valor añadido (u.m) X_2 = Empleo (horas) X_3 = Consumo agua de riego (m^3)

Así, para el ejemplo anterior, lo primero que se debe hacer para aplicar el método ZW, es resolver el siguiente programa lineal:

$$\text{Max } 0.33 + 0.33f_2 - 0.33f_3$$

s.a

$$f_1 - 1000x_1 - 3000x_2 - 1500x_3 = 0$$

$$f_2 - 500x_1 - 200x_2 - 200x_3 = 0$$

$$f_3 - 6000x_1 - 8000x_2 - 3000x_3 = 0$$

$$(\text{Conjunto de restricciones del modelo 34}) \quad (35)$$

Luego de haber resuelto el modelo (35), se procede a analizar la tabla generada por el método simplex, en el libro la muestran de la siguiente manera:

	Variables Básicas					Variables no básicas		
Base	x_1	x_3	Z_1	Z_2	Z_3	x_2	h_1	q_2
x_1								
x_3								
Z_1						-1500	1883	1,67
$\lambda \ Z_2$						0	0	-1
Z_3						-5000	1000	-10

Tabla 4. Extracto de la tabla final del simplex para la primera iteración del método Zions & Wallenius.

Fuente: Elaboración propia

Lo primero que se analiza en la tabla (4), son las bases que están asignadas para las filas $f_1, f_2, y f_3$. Así como también, las variables no básicas. Se puede observar que la variable h_1 , corresponde a la variable de holgura de la primera restricción y q_2 representa lo que se conoce como variable artificial para la última restricción. Por lo cual, en una tabla del Simplex, el coeficiente que pertenece al cruce entre una variable no básica con una variable básica. Evalúa la cantidad en la que el nivel de la variable básica se disminuiría en el caso de que si una unidad que pertenece a la variable no básica entra en la base. Por ejemplo, en el vector $T_1(-1500,0, -5000)$, si la variable x_2 entra en la base, un incremento unitario en el valor de dicha variable hace que aumente el valor añadido en 1500 unidades u.m. No se modifica el empleo y aumenta el consumo de agua en 5000 m³. Dicho vector, puede ser considerado como tasa de intercambio para el centro decisor, al igual que los otros dos vectores $T_2(1883,0, 1000)$ y $T_3(1,67,-1,-10)$. Seguidamente, para la continuación del método, las variables no básicas es necesario dividir las entre variables eficientes y no eficientes. Se entiende por variables no básicas eficientes, las que al introducirlas en la base conlleva a un punto extremo eficiente. Para ello, se realiza un programa lineal,

$$\text{Max } 1500 \lambda_1 - 5000 \lambda_3$$

s.a

$$-1800 \lambda_1 + 1000 \lambda_3 \leq 0$$

$$-1,67 \lambda_1 + \lambda_2 + 10 \lambda_3 \leq 0$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1 \quad (36)$$

Donde λ_1, λ_2 y λ_3 son los pesos asociados a cada atributo en la función objetivo agregada. En el modelo (36), la función objetivo, maximiza el aumento de la utilidad para el centro decisor, cuando la variable no básica x_2 entra en la base. Debido a que las otras dos desigualdades del modelo (36), respaldan la disminución en la utilidad, cuando las otras dos variables no básicas entran a la base. Por ende, si es positivo el óptimo de la función objetivo, la entrada en la base de la variable no básica x_2 lleva a una solución eficiente. Luego de hallar la eficiencia de las variables no básicas, es el inicio de la fase de decisión del método Zionts & Wallenius. Donde se presentan los diferentes vectores de tasas de intercambio. Así, al presentar el vector T_1 al centro decisor para su evaluación. Hay que preguntar si acepta un incremento en la cifra de valor añadido de 1500 u.m, mismo nivel de empleo y aumento del consumo de agua en 5000 m³. En el caso de que el centro decisor acepte el primer vector, los intercambios obtenidos en el vector T_1 incrementan la utilidad. Esto implica que habrá que considerar una restricción adicional.

$$1500 \lambda_1 - 5000 \lambda_3 \geq \varepsilon \quad (37)$$

Donde ε representa un factor con el objetivo de imponer un aumento de utilidad. Ahora en el caso de que el centro decisor no acepte los otros dos vectores de las tasas de intercambio, habría que incluir restricciones extras:

$$-1800 \lambda_1 + 1000 \lambda_3 \leq -\varepsilon \quad (38)$$

$$-1,67 \lambda_1 + \lambda_2 + 10 \lambda_3 \leq -\varepsilon \quad (39)$$

Por lo tanto, los valores de λ_1, λ_2 y λ_3 que satisfacen las restricciones del modelo (37) y (39) y la otra restricción normalizadora $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$, son el conjunto de pesos a vincular a cada atributo que son estables con las prioridades dadas por el centro decisor. Para el ejemplo $\lambda_1 = 0,50$ $\lambda_2 = 0,40$ $\lambda_3 = 0,10$, son los pesos que satisfacen las restricciones (37)-(38). En esta primera iteración se ha obtenido una aproximación de la función utilidad del centro decisor $u = 0,50 f_1 + 0,40 f_2 - 0,10 f_3$.

3.1.9. Métodos Multicriterio discretos (I)

En todos los problemas multicriterio que se han mencionado, existe un conjunto de soluciones factibles formado por infinitos puntos, es decir, las alternativas que toman en cuenta el centro decisor son infinitas. Este tipo de problemas, son llamados problemas continuos. Debido al carácter matemáticamente continuo del conjunto de soluciones factibles. Y aplican tanto para problemas mono criterios o multicriterio. Por otro lado, es importante destacar que, dentro de los problemas decisionales continuos, están aquellos, donde el número de alternativas para el centro decisor son finitas. Además, escasas, estos problemas son llamados del tipo discreto. (Romero, 1993).

A continuación, se desarrolla y presentan los elementos de cómo es la estructura de un problema decisional multicriterio discreto:

- ❑ Un conjunto de m puntos (E_1, E_2, \dots, E_m) los cuales representan las distintas alternativas posibles que son alcanzables para el centro decisor
- ❑ Un conjunto de n puntos (A_1, A_2, \dots, A_n) los cuales representan los criterios o atributos relevantes para el problema que se quiere estudiar.
- ❑ Un conjunto de $m \times n$ puntos ($R_{11}, \dots, R_{ij}, \dots, R_{mn}$) los cuales representan lo que se obtiene de cada alternativa en cada uno de los atributos tomando en cuenta.

Así mismo, un problema decisional multicriterio del tipo discreto se puede representar a través de una matriz como la siguiente:

Atributos

	A_1	A_2	....	A_j	....	A_n
E_1	R_{11}	R_{12}	....	R_{1j}	....	R_{1n}
E_2	R_{21}	R_{22}	....	R_{2j}	....	R_{2n}
.
.
E_i	R_{i1}	R_{i2}	....	R_{ij}	....	R_{in}
.
.
.
.
.
E_m	R_{m1}	R_{m2}	....	R_{mj}	....	R_{mn}

Tabla 5. Matriz decisional

Fuente: Elaboración propia

❑ Método ELECTRE

Según Romero (1993), uno de los métodos más conocidos y aplicados en la vida real, del tipo multicriterio discreto es el llamado ELECTRE. Fue propuesto por Benayoun, Roy y Sussman en 1966 y más adelante mejorado en 1971 por Roy. Este método, básicamente tiene como objetivo disminuir el tamaño del conjunto eficiente. Dividiéndolo en un subconjunto de alternativas que benefician más al centro decisor y otro subconjunto en donde las alternativas son menos favorables.

Para introducir el método ELECTRE, es importante definir el concepto de relación de sobre clasificación. Se entiende que una de las alternativas E_i sobre clasifica a otra E_m , cuando al menos los atributos a ser considerados de E_i son tan buenos como los de la otra alternativa E_m . Por otro lado, dicha sobre clasificación está basada en dos conceptos: a) El primero la concordancia, que mide hasta qué punto para un alto número de atributos la alternativa E_i es preferida a E_m b) El segundo la discordancia, que mide hasta qué punto no hay existencia de ningún atributo para el que E_m sea mucho mejor que E_i . Para que la Alternativa E_i sobre clasifique a otra alternativa E_m y pueda formar parte del subconjunto de opciones favorables. Es vital que la concordancia y discordancia no superen un umbral mínimo previamente establecido. Igualmente, es importante acotar que si E_i S (sobreclasifica) a E_m y E_m S a E_j , esto no quiere decir que E_i S a E_j , ya que no necesariamente los criterios que llevaron al centro decisor a preferir E_i sobre E_m , son los mismos criterios que llevaron a preferir E_m sobre E_j (Cabello, 2017).

Para llevar a cabo el algoritmo de Electre, primero se debe construir la matriz de decisión (Ver tabla 4) y asociar un peso W a cada uno de los n criterios que se tomen en cuenta para la evaluación. Seguidamente, se calcula la matriz de índices de concordancia a partir de la matriz de decisión (A_n, E_m) y el vector de pesos w . Los índices de concordancia $C(i, m)$ entre las distintas alternativas E_i y E_m , se obtiene sumando los pesos asociados a cada criterio en donde la alternativa i es mejor que m . Si llegara a pasar que, hay un empate, es decir, el criterio es igual de efectivo para las dos alternativas. Se asigna la mitad de peso para cada alternativa (Pallarés, 2015). A continuación, se presenta un ejemplo; Supongamos que una familia de 5 miembros desea mudarse y quieren saber la mejor opción de inmueble basado en sus criterios de selección: número de habitaciones, números de lavabos y tamaño de la vivienda (m^2), A cada uno de los criterios se les asigna los pesos W respectivamente:

$$W_1 = 0.20 \quad W_2 = 0.20 \quad W_3 = 0.60$$

Selección de un automóvil híbrido.

Se puede observar que el número de habitaciones es igual de importante que el número de lavabos y el tamaño de la vivienda es 6 veces más importante que los dos criterios anteriores.

A modo de ejemplo, se van a calcular los índices de concordancia de $C(A, B)$ y $C(D, A)$, a partir de los datos de la matriz de decisión inicial:

$$C(A, B) = 0 + 0 + 0.60 = 0.60$$

$$C(A, C) = 0.20/2 + 0 + 0 = 0.10$$

$$C(B, A) = 0.20 + 0.20 + 0 = 0.40$$

$$C(B, C) = 0.20 + 0.20 + 0 = 0.40$$

$$C(C, A) = 0.20/2 + 0.20 + 0.60 = 0.90$$

$$C(C, B) = 0 + 0 + 0.60 = 0.60$$

Atributos	número de habitaciones	números de lavabos	tamaño de la cocina
Alternativas			
A	5	4	30m ²
B	7	6	20m ²
C	5	5	35m ²

Tabla 6. Matriz decisional inicial

Fuente: Elaboración propia

Los $m \times n$ que representan los índices de concordancia, quedan reflejados en la matriz de índices de concordancia de la tabla 7.

	A	B	C
A	-	0.60	0.10
B	0.40	-	0.40
C	0.90	0.60	-

Tabla 7. Matriz de índices de concordancia

Fuente: Elaboración propia

Selección de un automóvil híbrido.

Posteriormente, se tienen que normalizar los elementos de la matriz de decisión inicial. Para realizarlo, se va a dividir cada elemento de la matriz entre la diferencia de su ideal y anti ideal del correspondiente atributo. A continuación, se presentan algunos de los cálculos para normalizar a modo de ejemplo, y la matriz decisional normalizada en la tabla 8:

$$R(A,1) = \frac{5}{7-5} = 2,5$$

$$R(A,2) = \frac{4}{6-4} = 2$$

$$R(A,3) = 2$$

$$R(B,1) = 3.5$$

$$R(B,2) = 3$$

$$R(B,3) = 1.333$$

$$R(C,1) = 2.5$$

$$R(C,2) = 2.5$$

$$R(C,3) = 2.333$$

Atributos	Número de habitaciones	Números de lavabos	Tamaño de la cocina
Alternativas			
A	2,5	2	2
B	3.5	3	1.333
C	2.5	2.5	2.333

Tabla 8. Matriz de decisión normalizada

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, con los datos de la matriz de decisión normalizada (Ver tabla 8). Se obtiene la matriz de decisión normalizada y ponderada, multiplicando cada columna de la misma por el peso correspondiente, a continuación, se presentan los datos obtenidos en la siguiente tabla:

Atributos	Número de habitaciones	Números de lavabos	Tamaño de la cocina
Alternativas			
A	$2,5 \cdot 0.20 = 0.5$	$2 \cdot 0.20 = 0.4$	$2 \cdot 0.60 = 1.2$
B	0.7	0.6	0.7998
C	0.5	0.5	1.3998

Tabla 9. Matriz de decisión normalizada y ponderada.

Fuente: Elaboración propia.

De la matriz anterior (Ver tabla 9), obtenemos los índices de discordancia de la siguiente manera. El índice de discordancia $d(i, k)$ entre las alternativas E_i y E_k se calcula como: La diferencia mayor entre los criterios para los que la alternativa k domina a la alternativa i . Seguidamente, se divide dicha cantidad por la mayor diferencia en valor absoluto entre los resultados obtenidos por la alternativa i y k . A continuación, se realizan los cálculos de discordancia:

$$d(A, B) = \frac{\text{MAX}|0.5-0.7; 0.4-0.6; |}{\text{MAX}|0.5-0.7; 0.4-0.6; 1.2-0.7998|} = \frac{0.2}{0.4002} = 0.4997$$

$$d(A, C) = \frac{\text{MAX}|0.4-0.5; 1.2-1.3998; |}{\text{MAX}|0.5-0.5; 0.4-0.5; 1.2-1.3998|} = \frac{0.1998}{0.1998} = 1$$

$$d(B, A) = 1$$

$$d(B, C) = 1$$

$$d(C, A) = 0$$

$$d(C, B) = 1$$

La matriz de índices de discordancia queda representada en la siguiente tabla:

	A	B	C
A	-	0.4997	1
B	1	-	1
C	0	1	-

Tabla 10. Matriz de índices de discordancia

Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso, en dicho algoritmo, es fijar un umbral mínimo c para el índice de concordancia. Así, como un umbral máximo para el índice de discordancia, en nuestro ejemplo estos son los índices fijados:

$$c = 0.5$$

$$d = 0.91$$

Inmediatamente, hay que calcular la matriz de dominancia concordante. Con los datos a partir de la matriz de índices de concordancia y el umbral c de la concordancia. Cuando un elemento de la matriz de concordancia es mayor que el umbral c en la correspondiente matriz de índices de concordancia, se escribe un uno de lo contrario cero. Para calcular la matriz de dominancia discordante, se calcula a partir de la matriz de índices discordancia y el umbral de discordancia. Opera de una manera parecida pero no igual en este caso. Cuando un elemento de la matriz de discordancia es menor, que el umbral d en la correspondiente matriz de discordancia, se escribe un uno. De lo contrario, cero.

A continuación, se presentan las matrices de dominancia concordante y dominancia discordante:

	A	B	C
A	-	1	0
B	0	-	0
C	1	1	-

Tabla 11. Matriz de dominancia concordante Fuente: Elaboración propia

	A	B	C
A	-	1	0
B	0	-	1
C	1	0	-

Tabla 12. Matriz de dominancia discordante

Fuente: Elaboración propia

Después de calcular las dos matrices anteriores. Se determina la matriz llamada dominancia agregada. Los elementos de esta matriz tendrán el valor de uno, cuando los elementos de las dos matrices tengan el valor uno. En contraste, tomarán el valor de cero cuando uno o los dos elementos de las matrices de dominancia tomen el valor cero.

	A	B	C
A	-	1	0
B	0	-	0
C	1	0	-

Tabla 13. Matriz de dominancia agregada

Fuente: Elaboración propia

Por último, para dibujar el grafo Electre, cada vértice del grafo representa una alternativa, el vértice i al k se traza si el elemento de la matriz de dominancia agregada es 1, a continuación, se representa el grafo de nuestro ejemplo:

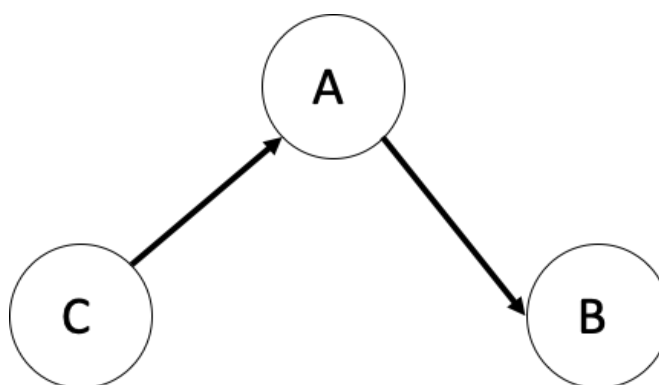


Figura 18. Grafo Electre y núcleos asociados

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el grafo anterior queda la alternativa C como el núcleo de la solución al problema (Ver figura 18).

3.1.10. Métodos Multicriterio discretos (II)

❑ El método de las jerarquías analíticas (método AHP)

Continuando con el tema de los métodos multicriterio discretos. Existe otro método que apareció en los años setenta propuesto por Thomas Saaty, quien basado en sus investigaciones en el área militar y experiencia en el área de docencia ayudó a crear una herramienta para la toma de decisiones llamada AHP (Analytic hierarchy process). El cuál, ha sido de gran influencia tanto nivel práctico como teórico (Toskano). A través de un ejemplo, se explicará cómo funciona el método.

Selección de un automóvil híbrido.

Supongamos, que el problema de decisión consiste en elegir la mejor academia de baile en Barcelona. Se consideran 3 alternativas de academias que denominaremos A, B Y C y los criterios de selección son: Distancia con respecto a la casa, precio de la cuota mensual y precio del seguro de accidentes. Lo que quiere decir que el problema multicriterio discreto es de 3×3 . La estructura jerárquica del problema, según el enfoque Saaty, es la que se representa en la figura 19. Donde, el primer nivel corresponde al objetivo del problema, el segundo a los criterios y el tercero a las alternativas posibles ¹.

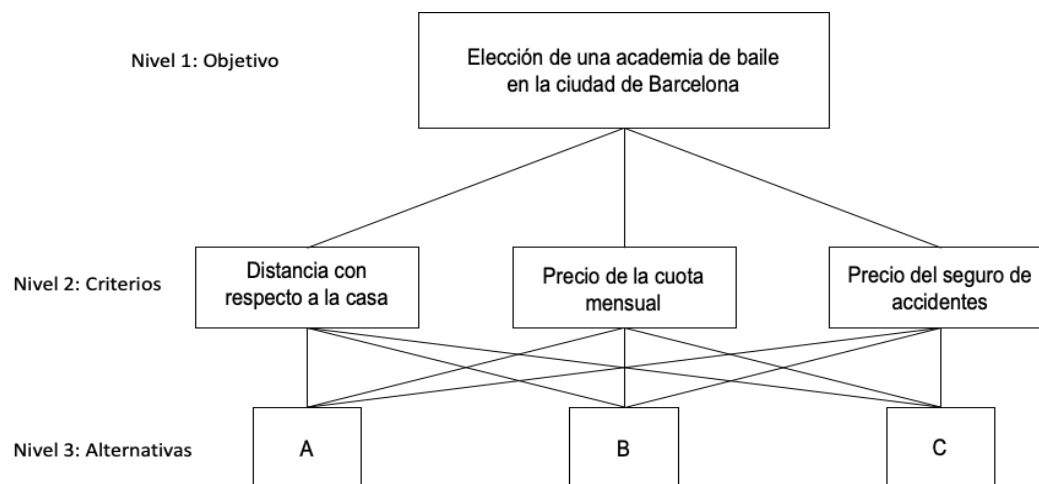


Figura 19. Academias alternativas de baile en la ciudad de Barcelona

Fuente: Elaboración propia

Una vez ya se sepa con claridad cuál es la estructura jerárquica del problema el centro decisor tiene que decir sus preferencias en cada nivel jerárquico, es decir, tiene que colocarle valores subjetivos por parejas para darle la importancia relativa a cada criterio y alternativa. Saaty recomienda utilizar una escala para darle la importancia relativa de preferencia, a continuación, se presenta la tabla 14 con las escalas de preferencias:

¹Los datos numéricos utilizados en el ejemplo son del libro Teoría de la decisión multicriterio de Carlos Romero (1993).

ESCALA DE PREFERENCIAS

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación Numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Tabla 14. Escala de preferencias

Fuente: Toskano

Para el segundo nivel jerárquico la matriz de comparación se presenta a continuación:

	Distancia	Precio cuota mensual	Precio seguro
Distancia	1	2	5
Precio cuota mensual	1/2	1	3
Precio seguro	1/5	1/3	1

Tabla 15. Matriz de comparación por parejas para el nivel jerárquico 2.

Fuente: Elaboracion propia.

Luego de tener los valores emitidos por el centro decisor. Ahora, se tiene que obtener un sistema de pesos, que sea coherente con las preferencias observadas en el cuadro de la matriz de comparación por parejas para el nivel jerárquico 2 (Ver tabla 15) y el conjunto de valores w tienen que ser no negativos.

El sistema de ecuaciones que derivan de la matriz es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 W_1 - 2W_2 &= 0 \\
 W_1 - 5W_3 &= 0 \\
 W_2 - 3W_3 &= 0
 \end{aligned} \tag{40}$$

Al igual que ocurre en el ejemplo y en la vida real, los juicios de valor del centro decisor no son suficientemente consistentes. Para que se pueda obtener un conjunto de pesos W que satisfaga exactamente el sistema, la única solución posible es $W_1 = W_2 = W_3 = 0$. De lo contrario, para que

Selección de un automóvil híbrido.

el sistema tenga una solución distinta. Es indispensable que el rango de la matriz de coeficientes sea menor que el número de incógnitas, haciendo que el determinante de los coeficientes sea cero. Para encontrar los pesos, que más se aproximan a los verdaderos, se acude a resolver como un problema de programación por metas ponderadas (Romero, 1993). A continuación, se presenta el modelo:

$$\text{Min } n_1 + p_1 + n_2 + p_2 + n_3 + p_3$$

$$W_1 - 2W_2 + n_1 - p_1 = 0$$

$$W_1 - 5W_3 + n_2 - p_2 = 0$$

$$W_2 - 3W_3 + n_3 - p_3 = 0$$

$$W_1 + W_2 + W_3 = 1$$

$$W \geq 0 \tag{41}$$

La última identidad (41), no es necesario para estimar los pesos del problema, solo que asegura que se obtengan los pesos normalizados. Al resolver el programa lineal se obtiene:

$$W_1 = 0.588 \quad W_2 = 0.294 \quad W_3 = 0.118$$

$$n_1 = p_1 = p_2 = 0 \quad n_3 = 0.0588 \quad p_3 = 0$$

Los resultados obtenidos al resolver la programación lineal fueron extraídos del libro Teoría de la decisión Multicriterio de Carlos Romero.

Se puede observar que se obtuvo el vector de la estimación de pesos y el valor óptimo del problema que en este caso sería $W_1 = 0.588$. Después, de finalizar el cálculo de los pesos para el nivel jerárquico 2. Ahora, el centro decisor le toca interactuar nuevamente, pero esta vez emitir sus preferencias para el nivel jerárquico 3, comparando cada alternativa con cada criterio. El cuadro para las matrices de comparaciones para el nivel jerárquico 3 con sus respectivos pesos, está a continuación:

a) Distancia

	A	B	C	Pesos W
A	1	6	3	0.667
B	1/6	1	1/2	0.111
C	1/3	2	1	0.222

Tabla 16. Matriz de comparación por parejas y estimaciones de pesos relativos para el nivel jerárquico 3.

Fuente: Elaboración propia

b) Precio cuota mensual

	A	B	C	Pesos W
A	1	1/9	1/5	0.069
B	9	1	2	0.621
C	5	1/2	1	0.310

Tabla 17. Matriz de comparación por parejas y estimaciones de pesos relativos para el nivel jerárquico 3.

Fuente: Elaboración propia

c) Precio seguro

	A	B	C	Pesos W
A	1	1/2	1/4	0.143
B	2	1	1/2	0.286
C	4	2	1	0.571

Tabla 18. Matriz de comparación por parejas y estimaciones de pesos relativos para el nivel jerárquico 3.

Fuente: Elaboración propia

Podemos observar que en la matriz de comparación (Tabla 16) del criterio distancia de la academia con respecto a la casa la alternativa A es preferida 6 veces más con respecto a la alternativa B. Mientras que la alternativa C es preferida dos veces más con respecto a la alternativa B.

Selección de un automóvil híbrido.

Para finalizar la aplicación del método se debe calcular los pesos globales para ambos niveles jerárquicos 2 y 3. Supongamos para obtener el peso global de la alternativa A se multiplica $0.667 \times 0.588 + 0.069 \times 0.294 + 0.143 \times 0.118$ que da como resultado 0.429. A continuación, se presenta el cuadro con cada uno de los pesos globales:

Criterios Alternativas	Distancia 0.588	Precio cuota 0.294	Precio seguro 0.118	Pesos Globales
A	0.667	0.069	0.143	0.429
B	0.111	0.621	0.286	0.282
C	0.222	0.310	0.571	0.289

Tabla 19. Determinación de los pesos globales.

Fuente: Elaboración propia.

❑ El método axiomático de Arrow - Raynaud

Existe otro método conocido como axiomático de Arrow & Raynaud propuesto en el libro de Social Choice and Multicriterion Decision Making en 1986. El axioma está basado en la idea de dichos autores, que pretenden conectar los problemas de elección multicriterio discretos con la teoría de la elección. Para ellos, es suficiente considerar cada atributo o criterio como un agente social, y así pueda existir un correlato formal entre problemas multicriterio y elección social perfecto. Dichos autores, realizaron distintas investigaciones para conseguir un axioma que fuera consistente, para satisfacer los métodos multicriterio discretos y obtener un resultado lógico, y que no fuera arbitrario. El cuál, fue basado en 5 axiomas descritos en el libro que fue mencionado anteriormente (Romero,1993).

El algoritmo funciona de la siguiente manera: I_{ik} representa el número de criterios para los que la alternativa i-ésima domina la alternativa k-i ésima. Luego, denominamos a la matriz cuadrada $B = [I_{ik}]$ matriz de clasificación y sus elementos coeficientes de clasificación. El algoritmo se desarrolla en base a dicha matriz de la siguiente manera:

Primero, hay que escoger el elemento máximo de cada fila de la matriz de clasificación y entre ellos se selecciona el más pequeño. Si existiera un empate se eligiera arbitrariamente cualquiera de los dos. La alternativa perteneciente pasaría a ser la peor elección y tendría que ser eliminada la fila y columna correspondiente. Cuando se obtiene la nueva matriz, se realiza el mismo procedimiento hasta que queda un solo elemento que corresponderá a la mejor alternativa. A continuación, se presenta un ejemplo del axioma. Se tomarán los datos del cuadro de la tabla 6 del apartado 3.1.9, que fueron utilizados para desarrollar el método Electre. De allí, se obtiene la siguiente matriz de clasificaciones:

	A	B	C
A	-	1.8	0.3
B	1.2	-	1.3
C	2.7	1.8	-

Tabla 20. Matriz de clasificación de Arrow-Raynaud

Fuente: Elaboración propia

En el primer paso del algoritmo se obtiene:

$$\text{Min } [1.8 \ 1.3 \ 2.7] = 1.3$$

Por lo tanto, eliminamos la alternativa B, quedando como la peor elección. Nos queda la siguiente matriz:

	A	C
A	-	0.3
C	2.7	-

Tabla 21. Matriz de clasificación luego de eliminar la alternativa b

Fuente: Elaboración propia

Aplicando nuevamente el primer paso del algoritmo se obtiene:

$$\text{Min } [0.3 \ 2.7] = 0.3$$

Así, se elimina la alternativa A, quedando como la mejor elección la opción C con la siguiente ordenación de alternativas

$$C \Leftarrow A \Leftarrow B$$

Selección de un automóvil híbrido.

Como podemos observar la solución a través del axioma resulta coincidir con el resultado obtenido en el método Electre (Ver figura 18).

3.1.11. Conclusiones del estado del arte

Luego de la investigación realizada acerca de la teoría de la decisión multicriterio, se han profundizado los conocimientos. Se puede expresar que existen diferentes enfoques. Los cuales, nos sirven de herramientas, para encontrar la solución a nuestro problema de decisión. Dependiendo del contexto y lo que se quiere lograr, será más conveniente utilizar un enfoque u otro. Alguno de ellos, su aplicación es más complicada porque requiere de cálculos complejos, como es el caso de los enfoques interactivos. Asimismo, para el desarrollo del método Zionts & Wallenius, se necesitan conocimientos profundos acerca de la lógica y mecánica operativa del Simplex.

Por otro lado, se puede observar, que los métodos se encuentran relacionados entre sí. En el caso de la programación por metas, puede ser aplicado, como un caso particular de la programación multiobjetivo, ya que, en problemas de cierto tamaño, la operatividad de uno con respecto al otro es superior, respectivamente.

Finalmente, indagar en los enfoques, me ha permitido decidir que el análisis jerárquico y la programación compromiso son las metodologías, que se utilizaran para el desarrollo del estudio.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE COCHES HÍBRIDOS

En este capítulo, se muestra la metodología empleada para la selección de coches híbridos. Para ello, en el primer apartado, se expone la elaboración previa del trabajo que se realizó para poder aplicar los dos métodos multicriterio. En el segundo apartado, se explica paso a paso como aplicar el método AHP. Y en el último apartado, se detalla, como emplear la programación compromiso.

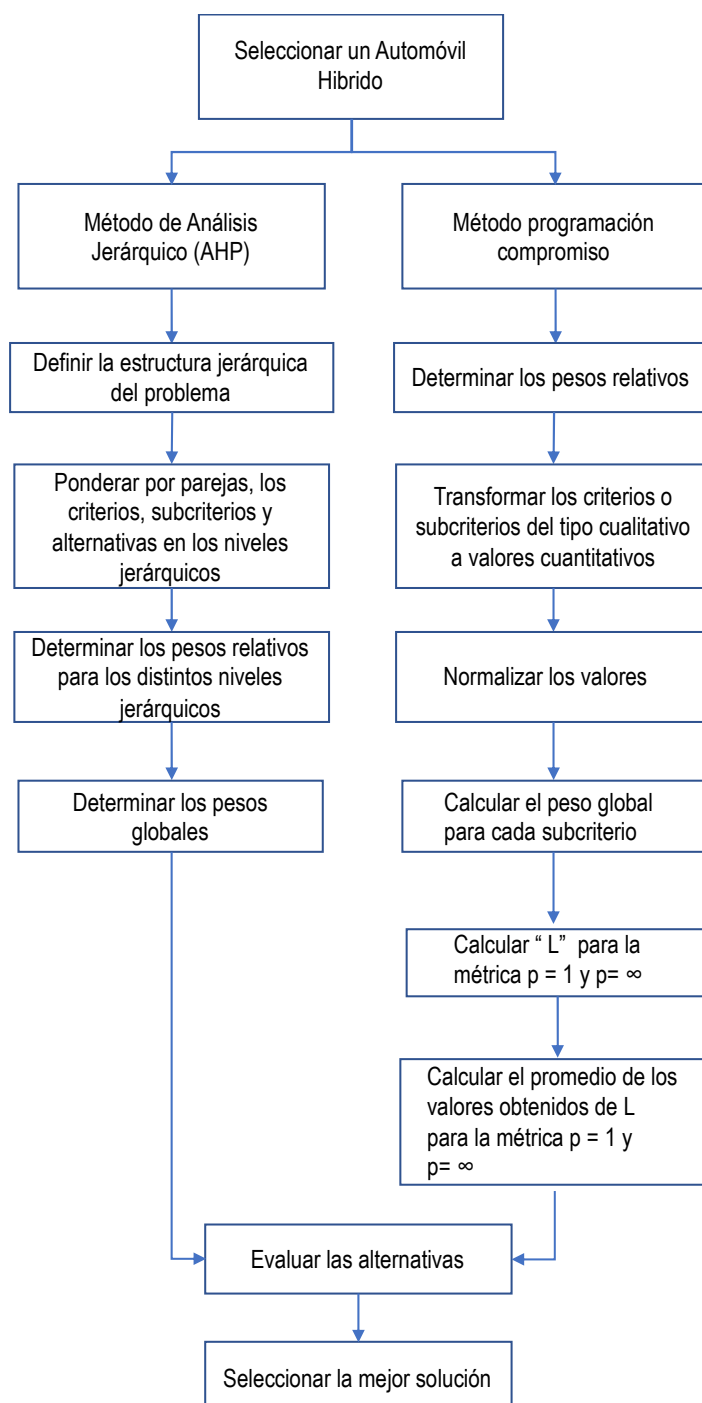


Figura 20. Metodología para la selección de un automóvil híbrido

Fuente: Elaboración propia

4.1. Elaboración del trabajo

4.1.1. Definición de criterios y subcriterios

Previamente, para realizar la aplicación del método análisis jerárquico y programación compromiso, se deben seleccionar los criterios a tomar en cuenta, para la adquisición del automóvil híbrido. La definición de criterios reside en determinar un conjunto de criterios que, consecutivamente, permitirán evaluar las alternativas (Domenech, 2013). Para esto, es recomendable, que los criterios cumplan con ciertos requisitos: a) Ser suficientes para que la opinión de todos los actores involucrados este incluida b) No ser demasiados para entorpecer el llegar a un acuerdo c) Ser medibles y con unas diferencias bien marcadas entre sí para evitar redundancias y permitir un análisis claro y preciso. Así como también, se recomienda agrupar los criterios existentes en 4 grupos (Domenech, 2013).

Una vez finalizada la revisión de esta literatura, se visitaron 4 concesionarios de la ciudad de Barcelona: Mazda, Toyota, Opel y Seat. Allí, se conversó con los profesionales del sector automotriz haciéndoles preguntas acerca de los automóviles híbridos: a) Que son los automóviles híbridos y cómo funcionan b) cuáles son los criterios que se inclinan mayormente los clientes para seleccionar los coches c) Por qué las personas están optando por comprar coches con estas nuevas tecnologías. De Las preguntas realizadas a los asesores de los concesionarios, se pudo obtener la siguiente información. Primero, los automóviles híbridos poseen un motor que funciona con la combinación de dos fuentes de energía distintas: Gasolina y Electricidad. Y actualmente, la oferta de modelos es amplia y han ido creciendo poco a poco. Asimismo, existen otros coches que funcionan a gas, pueden ser con gasolina y GLP (gas licuado de petróleo) o gasolina y GNC (gas natural comprimido). Los coches de GLP son también una buena opción para el cliente. La oferta de modelos es cada vez más grande en España y en toda Europa. Existen muchas estaciones de servicio para repostar GLP, las cuales seguirán expandiéndose. Por otro lado, si se compara con la gasolina o diésel, el GLP tiene un precio menor. En consecuencia, el coste por kilómetro es más barato en modelos de esta característica. En cuanto a los coches de GNC, el combustible utilizado es el mismo que emplean para las calderas en las casas, es almacenado con mayor presión que el GLP y está compuesto por metano. Consecuentemente, es más limpio que el diésel o la gasolina y, por tanto, produce menos CO₂. La desventaja de este combustible es que no existen muchas estaciones de servicio, alrededor de 65, pero se prevé que aumente esta cifra en los próximos meses. Segundo, se obtuvo información acerca de cuáles son los posibles criterios, que los clientes toman en cuenta al adquirir uno de ellos, tal como: El precio del vehículo, el tamaño del coche, cuanto tiempo será la circulación del coche en la ciudad, el tipo de combinación de la fuente de energía para el funcionamiento del carro (Eléctrico, Híbrido, GLP o GNC), los sistemas de seguridad pasiva (cinturones

Selección de un automóvil híbrido.

de seguridad, airbags, chasis, carrocería, entre otros) y activa del coche (detectores de peatones, las alertas de cambio de carril, sistema de frenado, iluminación, etc.), la contaminación del coche a lo que emisiones de CO2 se refiere, el confort del coche (para viajes largos y cortos), la marca del vehículo, tipo de transmisión, si es enchufable o no, el diseño del coche y los impuestos. Por último, los expertos opinan, que algunas razones por la que los clientes están optando por estas alternativas son: a) Ayudan a disminuir la contaminación b) Los coches híbridos tienen un 30% de descuento en los impuestos de circulación y matriculación c) Lo ven como una inversión, ya que a la larga es un ahorro debido a las leyes de circulación de coches que se están implementando, como se mencionó anteriormente.

Posteriormente, recopilada toda esta información, se evalúa cuáles son los criterios que serán utilizados para el desarrollo del estudio. Inicialmente, se seleccionaron 16 (sub) criterios, que se deberían tomar en cuenta para la selección: 1) Consumo medio 2) Precio 3) Impuestos 4) Tamaño 5) Tipo de transmisión 6) Tamaño maletero 7) Velocidad máxima 8) Capacidad de depósito de combustible 9) Capacidad de la batería 10) Autonomía eléctrica 11) Preferencia de la Marca 12) Emisiones CO2(E) 13) Concesionarios y talleres oficiales en la ciudad 14) Cilindrada 15) Potencia Máxima 16) Tipo de tracción. Luego, de esta preselección de criterios, se eliminaron 4 de ellos (Capacidad de la batería, cilindrada, potencia máxima y tipo de tracción). El (sub) criterio capacidad de la batería de un coche fue eliminado porque se encuentra estrechamente relacionado con la autonomía eléctrica, lo que ocurre es que están medidas en unidades diferentes y pudiera confundirse que son distintos conceptos, pero realmente conllevan a lo mismo, por tanto, era redundante tomarlo en cuenta. En cuanto a la cilindrada y potencia máxima, acontece algo similar, ya que a mayor cilindrada existe una mayor potencia y en consecuencia una mayor velocidad, lo que hace redundante, tomar en cuenta 3 criterios por separado, que al final ayudan a que el coche alcance más velocidad. Por último, el tipo de tracción del automóvil, los cuales existen 3: tracción delantera, tracción trasera y tracción total (delantera y trasera), no se tomó en cuenta porque la mayoría de las personas, cuando van a comprar un coche híbrido el tipo de tracción no lo consideran, al menos que sea un caso específico que las personas lo evalúan dependiendo del uso que le van a dar al coche. De igual manera, no era relevante colocarlo, ya que, si comparas un automóvil de tracción trasera o delantera con otro a tracción total, comúnmente los clientes prefieren a tracción total. Esto hace que no exista una diferencia suficientemente marcada entre sí. Consecuentemente, puede impedir tener un análisis claro y preciso.

Finalmente, se escogieron 12 (sub)criterios para el desarrollo del estudio, ya que fueron los que se consideraron que aportan información relevante en la selección de un coche híbrido, según lo conversado

Selección de un automóvil híbrido.

con los expertos. Posteriormente, los criterios fueron agrupados en 4 categorías, según la naturaleza del (sub)criterio, para manejarlos con mayor facilidad en el desarrollo del método.

A continuación, se presentan las 4 categorías de criterios y los subcriterios que pertenecen a dicho grupo.

❑ **Criterio Coste:** Los subcriterios de este grupo, están relacionados con el coste del coche, es decir, el dinero que se invertirá en él, que depende del consumo, precio e impuestos del automóvil

- a) Consumo medio (CM): Se refiere a la cantidad de litros de gasolina que utiliza el automóvil en promedio cada 100 km.
- b) Precio(P): Se refiere al coste del vehículo que la persona desea comprar.
- c) Impuestos(I): Se refiere al impuesto de circulación. La cantidad de dinero que hay que pagar a la administración pública una vez al año, según el tipo de automóvil que haya adquirido el cliente.

❑ **Criterio comodidad:** Los subcriterios de este grupo se refieren a que tan placentero es el coche. En lo que se refiere al tamaño, tipo de transmisión y tamaño maletero.

- a) Tamaño(T): Se refiere a las dimensiones físicas del automóvil en cm^3 .
- b) Tipo de transmisión (TT): Se refiere a si el vehículo es automática o manual. La transmisión tiene como objetivo hacer llegar el giro del motor hasta las ruedas, ajustando el par motor a las necesidades de acarreo del vehículo. Se valora de la siguiente manera: a) 1: Nada preferido y 5: Preferido. Por ejemplo, si prefieres un automóvil con transmisión automática, el valor es 5.
- c) Tamaño Maletero (TM): Se refiere al tamaño del maletero en volumen medida en litros.

❑ **Criterio Eficiencia del automóvil:** Los subcriterios de este grupo se refieren, a las capacidades del automóvil, en cuanto a su velocidad, capacidad de depósito de combustible y su autonomía eléctrica.

- a) Velocidad máxima (VM): Se refiere a la rapidez máxima que puede alcanzar el vehículo medida en km/ h.

Selección de un automóvil híbrido.

b) Capacidad depósito de combustible (CDC): Se refiere a la cantidad máxima de combustible(gasolina) medida en litros para tener un mayor recorrido sin necesidad de ir a una estación de servicio.

c) Autonomía eléctrica (A): Se refiere a los kilómetros que puede recorrer el automóvil sin necesidad de carga eléctrica.

☐ **Criterio Adicionales:** Se refiere a subcriterios adicionales, que las personas toman en cuenta, antes de comprar un coche híbrido: La marca, las emisiones de CO2 y concesionarios y talleres oficiales en la ciudad.

a) Preferencia de la Marca(M): Se refiere a que tan preferida es la marca del automóvil. Se valora de la siguiente manera: 1 es nada preferida, 2 poco preferida, 3 medianamente preferida, 4 muy preferida y 5 extremadamente preferida.

b) Emisiones CO2(E): Se refiere a la cantidad de carbono que emite el automóvil cuando está en uso. Se mide en gramos por kilómetro recorrido.

c) Concesionarios y talleres oficiales en la ciudad: Se refiere al número de concesionarios disponibles en la ciudad de Barcelona.

4.1.2. Selección de las alternativas

Seguidamente, es necesario escoger 5 alternativas de automóviles para emplear la herramienta de selección. Para ello, se buscó información de los coches híbridos existentes en el mercado a través de la revista urban, la nueva movilidad. La cual ha escogido 7 automóviles híbridos existentes en el mercado, que se consideran los mejores en relación calidad-precio: Kya Niro Hybrid, Ford Mondeo Hybrid, Toyota Yaris 100 Hybrid, Hyundai Ioniq Hybrid, Mitsubishi Outlander PHEV, Volvo V60 Twin Engine y Mini Country S E All4. Para el estudio, se optó por 5 de ellos, que tuvieran especificaciones y características lo menos parecidas posible. Se seleccionaron según el grado de electrificación, tipo de automóvil (coche o camioneta) y distintiva ambiental. Primero, se escogió el Kya Niro Hybrid, el Toyota Yaris 100 Hybrid y Hyundai Ioniq Hybrid que poseen tecnología híbrida. Luego, el Mitsubishi Outlander PHEV y el Volvo 60 T8 Twin Engine que son híbridos enchufables. Por otro lado, el Toyota Yaris 100 Hybrid y Hyundai Ioniq Hybrid son coches tipo sedán. De lo contrario, el Kya Niro Hybrid, el Mitsubishi Outlander PHEV y el Volvo 60 T8 Twin Engine son automóviles tipo SUV (Sport Utility vehicle). Por último, el Kya Niro Hybrid, el Toyota Yaris 100 Hybrid y Hyundai Ioniq Hybrid poseen la etiqueta ECO. Mientras que, el Mitsubishi Outlander PHEV y el Volvo 60 T8 Twin Engine la distintiva ambiental es CERO emisiones. Por otro lado,

Selección de un automóvil híbrido.

el modelo Ford Mondeo Hybrid no se escogió, ya que tiene características similares a los coches híbridos mencionados en cuanto al tamaño consumo, entre otros, por lo cual no vale la pena incluirlo en las alternativas. De esta misma manera, tampoco se eligió el Mini Countryman S E All4, debido a que tiene bastante similitud con el Mitsubishi Outlander PHEV en cuanto al precio, tamaño, consumo, etc. Finalmente, los 5 automóviles que se utilizaron para el estudio son: el Toyota Yaris 100 Hybrid, Kia Niro Hybrid, Hyundai Ioniq Hybrid, Mitsubishi Outlander PHEV y Volvo V60 Twin Engine

A continuación, se presenta una breve información general, de cada alternativa de coche, según la revista Urban la nueva movilidad (2019):

- ❑ **Toyota Yaris 100 Hybrid (THY):** La gama japonesa cuenta con uno de los híbridos más accesibles del mercado. Su lanzamiento fue enero del 2015 y se renovó a final del año 2017. Posee un propulsor de gasolina de 1,5 litros y un motor eléctrico de 45Kw, para desarrollar una potencia combinada de 101 CV. Se ofrece en 5 niveles de acabado: Active, Active Tech, Feel, Advance y GR Sport. **(Etiqueta Eco).**
- ❑ **Kia Niro Hybrid (KNH):** El Kia Niro tiene 4,35 m de largo y con un maletero de 427 litros. Está disponible con tecnología híbrida (HEV), híbrida enchufables (PHEV) y eléctrica (EV). Llegó al mercado en el 2016 tiene una batería de iones de litio ubicada bajo el asiento trasero con una capacidad de 1,56Kwh. La potencia máxima del conjunto es de 141CV. Posee una caja de cambios automática de doble embrague con seis velocidades. Ofrece 3 acabados: Concept, Drive y Emotion. **(Etiqueta Eco)**
- ❑ **Hyundai Ioniq Hybrid (HYH):** El Hyundai Ioniq mide 4,47 m de largo con un maletero de 443 litros que puede llegar a incrementar si se abaten los asientos traseros. Al igual que el Kia está disponible con tecnología híbrida (HEV), híbrida enchufables (PHEV) y eléctrica (EV). Posee un motor de gasolina 1.6GDI y un propulsor eléctrico, que juntos alcanzan una potencia de 141CV. Se ofrece con tres niveles de acabados: Klass, Tecno y Style. **(Etiqueta Eco)**
- ❑ **Mitsubishi Outlander PHEV (MO):** El Mitsubishi híbrido enchufable es de 4,69 m de largo y su venta empezó en el año 2013, y se ha ido renovando hasta finales de 2018. Posee un propulsor de gasolina 2.4 de 135CV y dos motores eléctricos en el eje delantero y trasero que hacen que tenga una tracción total. Puede adquirirse con dos acabados: Motion y Kaiteki. **(Etiqueta 0 emisiones, Azul)**

Selección de un automóvil híbrido.

- ❑ **Volvo 60 T8 Twin Engine (V60):** El volvo V60 llegó al mercado a finales del 2018 y con una alternativa híbrida enchufable por primera vez y es la versión tope de gama, que mide 4,76m con un maletero de 529 litros. Posee un propulsor de gasolina de 2,0 de 4 cilindros con turbo con un motor eléctrico de 65Kw, desarrollando una potencia combinada de 390CV. (**Etiqueta 0 emisiones, Azul**).

A continuación, se presenta las especificaciones de las alternativas escogidas en la tabla 22,23,24 y 25.

	Alternativas				
Subcriterios	TYH(HEV)	KNH(HEV)	HIH(HEV)	MO(PHEV)	V60(PHEV)
CM	3,9 litros/100 km	3,8 litros/ 100 km	4,5 litros/ 100 km	1,8 litros / 100 km	1,8 litros/ 100 km
P	16.400 euros	22.725 euros	37.100 euros	36.000 euros	58.950 euros
I	34,08 euros	34,08 euros	34,08 euros	71,94 euros	71,94 euros

Tabla 22. Especificaciones de las alternativas. Criterio Coste

Fuente: Elaboración propia

	Alternativas				
Subcriterios	TYH	KNH	HIH	MO	V60
T	394 x 169 x 151 = 10.054,486	435 x 180 x 153 = 11.979,900	447 x 182 x 145 = 11.796,330	469 x 180 x 171 = 14.435,820	476 x 185 x 142 = 12.504,520
TT	Automática	Manual	Automática	Automática	Automática
TM	286	427	443	498	529

Tabla 23. Especificaciones de las alternativas. Criterio Comodidad

Fuente: Elaboración propia

	Alternativas				
Subcriterios	TYH	KNH	HIH	MO	V60
VM	165	164	178	135	100
CDC	16	45	43	60	60
A	2	3	52	54	45

Tabla 24. Especificaciones de las alternativas. Criterio eficiencia del automóvil.

Fuente: Elaboración propia

	Alternativas				
Subcriterios	TYH	KNH	HIH	MO	V60
M	Toyota	Kia	Hyundai	Mitsubishi	Volvo
E	96	88	26	40	42
CEC	6	18	5	3	5

Tabla 25. Especificaciones de las alternativas. Criterio Adicionales

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Construcción de la tabla para el método programación compromiso

Por otro lado, para la aplicación de la programación compromiso, se tienen que calcular previamente los pesos relativos. Existen diversas herramientas para obtenerlas como se mencionó anteriormente. Para, este caso en particular, los pesos relativos se obtuvieron a través del método AHP.

Seguidamente, para la aplicación de la programación compromiso es necesario que todos los criterios y subcriterios de selección estén medidas en una escala cuantitativa. Por lo tanto, los subcriterios que son del tipo cualitativo (tipo de transmisión, preferencia de la marca) se transforman en valores cuantitativos. (Ver Criterios de Selección pág. 68 y 69). Para ello, se asignó una escala para medir la preferencia en cuanto al tipo de transmisión y marca. Por ejemplo, si las personas prefieren un coche manual, antes que uno automático. Inmediatamente, se le asigna el valor 5 al coche con transmisión manual, y 1 al de transmisión automática. Para el subcriterio preferencia de la marca, por tanto, si la marca Kia, para el usuario es extremadamente preferida, se le da un valor de 5. Si la marca Mitsubishi es medianamente preferida se le asigna el valor de 3. A continuación, la tabla 26 presenta todas las especificaciones de las alternativas en una escala cuantitativa.

Selección de un automóvil híbrido.

Sub criterios	Alternativas				
	Toyota Yaris 100 hybrid	Kia Niro	Hyundai Ioniq	Mitsubishi Outlander PHEV	Volvo V60 T8 Twin Engine
Consumo medio	3,90	3,80	4,50	1,80	1,80
Precio	16400,00	22725,00	37100,00	36000,00	58950,00
Impuestos	34,08	34,08	34,08	71,94	71,94
Tamaño (cm3)	10054,49	11979,90	11796,33	14435,82	12504,52
Tipo de transmisión	5,00	1,00	5,00	5,00	5,00
Tamaño Maletero (Litros)	286,00	427,00	443,00	498,00	529,00
Velocidad Máxima (km/h)	165,00	164,00	178,00	135,00	100,00
Capacidad deposito de combustible	16,00	45,00	43,00	60,00	60,00
Autonomía (km)	2,00	3,00	52,00	54,00	45,00
Marca	5,00	3,00	1,00	4,00	3,00
Emisiones Co2(g/km)	96,00	88,00	26,00	40,00	42,00
Concesionarios y talleres oficiales	6,00	18,00	5,00	3,00	5,00

Tabla 26. Especificaciones de las alternativas

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 26, el subcriterio tipo de transmisión con respecto a la alternativa Volvo V60 tiene un valor de 5 en la casilla, es decir, la caja de cambio automática es más preferida, mientras que el Hyundai con caja de cambio manual tiene en su casilla un valor de 1, es decir, menos preferida. En el caso del subcriterio preferencia de la marca, Toyota tiene un 5, significa que esta marca es extremadamente preferida mientras que Volvo v60 tiene un 3, es decir, medianamente preferida (Ver Criterios de selección).

4.1.4. Super Decisions Software

4.1.4.1. Introducción al software

El software Super Decisions se utiliza para la toma de decisión con dependencia. Implementa el proceso de jerarquía analítica (AHP) y el proceso de red analítica. Es una herramienta para crear y administrar modelos AHP y ANP. Donde se puede ingresar los juicios, obtener resultados y realizar análisis de sensibilidad en los resultados (www.superdecisions.com). El proceso para la solución de un problema multicriterio está sujeto al esquema mostrado en la Figura 21.



Figura 21. Proceso de la modelación de un problema de multicriterio, software Super Decisions

Fuente: Castillo, M.

Un modelo de decisión jerárquica tiene un objetivo, criterios que serán evaluados según la importancia con respecto al objetivo y las alternativas que se evalúan para saber cómo es la preferencia en base a los criterios seleccionados. Por tanto, todos los modelos que se generan bajo la metodología AHP, debe poseer al menos 3 niveles. (Castillo, 2014). El objetivo, los criterios y alternativas son los elementos en un problema de decisión o nodos en el modelo. En la figura 22, se puede ver una representación abstracta de una decisión jerárquica. Donde, las líneas que conectan el objetivo (Goal) con cada criterio, significa que ese criterio tiene que ser comparado en parejas para evaluar su importancia con respecto al objetivo. De igual manera ocurre con las líneas conectadas a cada criterio con las alternativas, eso significa que hay que comparar en parejas las alternativas para saber cuál es más preferida con respecto al criterio que se está evaluando. Como se muestra en la figura 22, existen 6 comparaciones por parejas en el modelo, uno para comparar el criterio con respecto al objetivo y 5 para las alternativas con respecto a los 5 criterios.

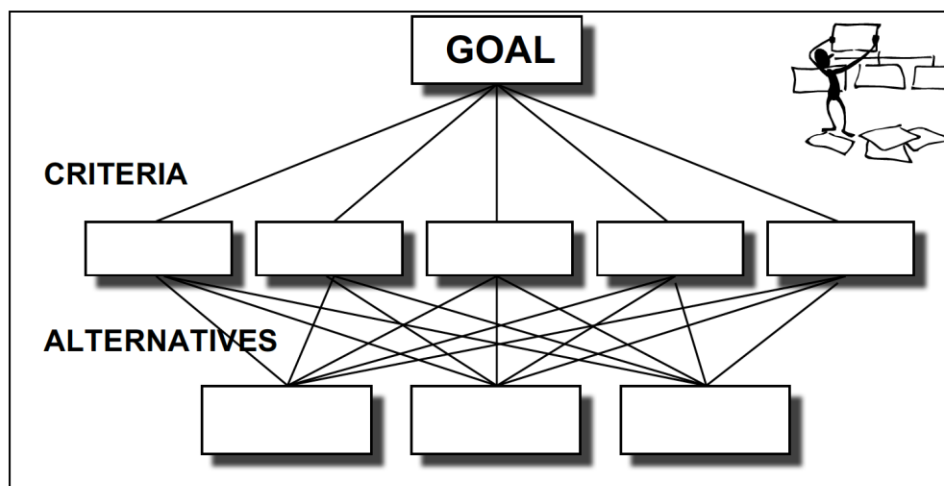


Figura 22. Representación abstracta de una decisión jerárquica Fuente: www.Superdecisions.com

4.1.4.2. Construcción del modelo

Antes de la construcción del modelo, se debe tener claro cuáles son las alternativas que se van a considerar en el proceso de decisión y sus principales características. Seguidamente, un sistema de criterios que permita comparar las alternativas propuestas. Dicho sistema, supone la construcción de redes de relaciones entre los aspectos fundamentales de análisis del problema (actores involucrados, actividades, posibles resultados y características de las alternativas que pueden estar en variables cuantitativas o/y cualitativas) (Castillo, 2014). Un modelo Super Decisions consiste en un grupo (Clúster) de elementos (o nodos), arreglados por niveles (Figura 23)

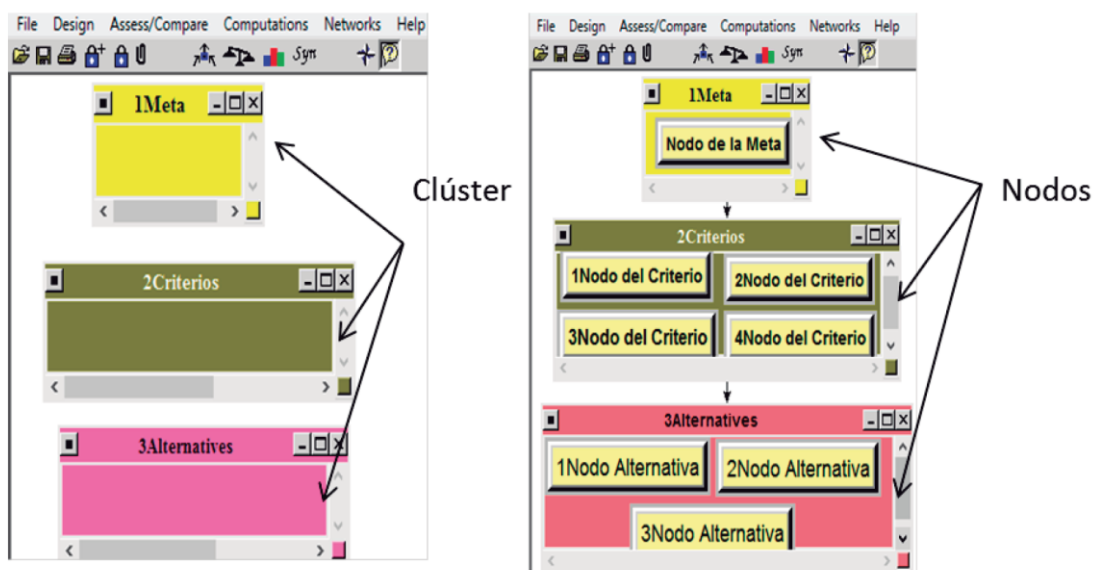


Figura 23. Construcción del modelo

Fuente: Castillo, M.

Selección de un automóvil híbrido.

En el caso del estudio, el modelo tiene 7 Clústeres. 1. La meta 2. Los criterios 3. Subcriterio coste 4. Subcriterio comodidad 5. Subcriterio eficiencia del automóvil 6. Subcriterios adicionales 7. Las alternativas. Luego, cada clúster del modelo está compuesto por nodos. El primero, tiene el nodo de la meta: La selección de un automóvil híbrido. El segundo, Los nodos de las 4 categorías de criterios: Coste, comodidad, eficiencia del automóvil y adicionales. El tercero, los nodos de los subcriterios del criterio coste: Consumo medio, precio e impuestos. El cuarto, los nodos de los subcriterios del criterio comodidad: Tamaño, tipo de transmisión y tamaño maletero. El quinto, los nodos de los subcriterios del criterio eficiencia del automóvil: Velocidad máxima, capacidad de depósito de combustible y autonomía eléctrica. El sexto, los nodos de los subcriterios del criterio adicionales: Preferencia de la Marca, Emisiones CO2 y concesionarios y talleres oficiales en la ciudad (Ver Anexo B1).

4.1.4.3. Evaluación / comparación por pares

Posteriormente, a la construcción del modelo en el software, se realiza la evaluación y comparación por pares de los 7 clústeres. La comparación por parejas es un proceso utilizado para ir confrontando el nivel relativo de importancia o preferencia de 2 elementos, tal como, criterio(comodidad) con respecto a la meta (Selección de un automóvil híbrido) en el nivel superior para establecer las prioridades de los elementos que se están comparando. Las comparaciones por parejas se realizan para todo el conjunto de nodos. Es importante tomar en cuenta que los nodos que se confrontan están siempre en el mismo clúster y se comparan con respecto a su elemento padre, que es el nodo del cual están conectados. La comparación, se realiza a través de un cuestionario, como el que se muestra en la figura 24. (Ver anexo B 2.)

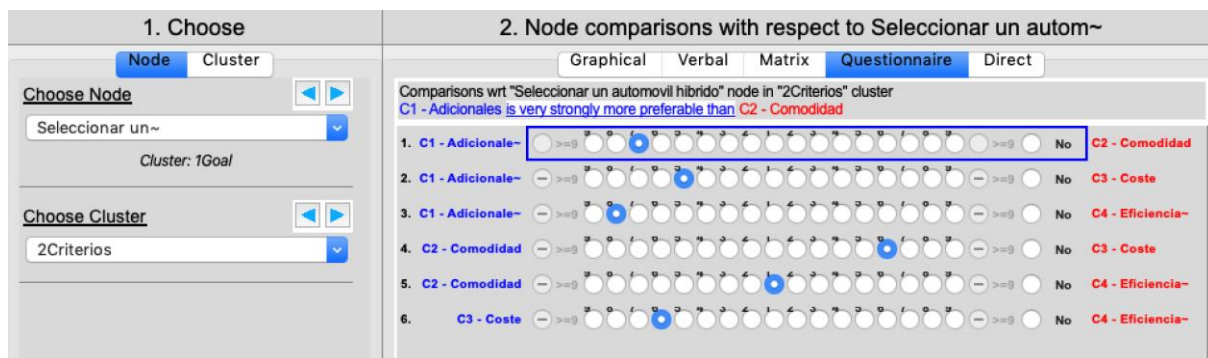


Figura 24. Comparación por pares tipo cuestionario Super Decisions Fuente: Super Decisions Software

En la figura 24, se realizan las comparaciones por parejas del nodo meta con respecto a los 4 nodos de los criterios a través de un cuestionario en una escala de preferencias del 1 al 9 (Ver tabla 14). Por ejemplo, en la comparación entre el criterio adicionales y el criterio comodidad, se respondió un 7. Lo

Selección de un automóvil híbrido.

que quiere decir, que el criterio adicional es muy fuertemente preferible más que el criterio comodidad. Además, se puede observar que a la derecha hay un cuadro llamado “3. Results”. En esa parte, se reflejan los pesos relativos, que se obtienen de la encuesta para cada criterio.

Posteriormente, el programa te muestra la matriz obtenida del cuestionario, el vector propio (pesos relativos) y la ratio de consistencia ² de la misma.

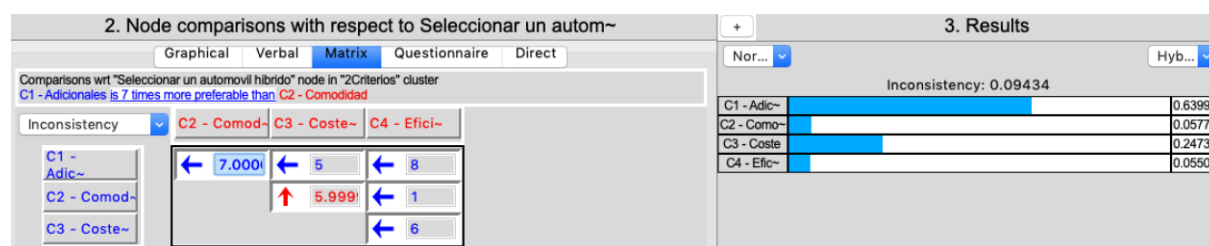


Figura 25. Matriz de comparación por pares Super Decisions Fuente: Super Decisions Software

En la figura 25, se ve reflejada la matriz, de los juicios del centro decisor que fueron emitidos en el cuestionario. Por ejemplo, el criterio adicional es 7 veces preferible que el criterio comodidad y 5 veces preferible que el criterio coste. Así mismo, en el apartado “3. Results” se observa que la ratio de consistencia no es perfecta ya que vale, 0,094.

De igual manera, este valor de inconsistencia es aceptable al ser menor que 0,1 según Saaty (1980). (Domenech, 2013). Además, se observan los pesos relativos obtenidos para cada criterio. Por ejemplo, el criterio adicional tiene un peso relativo de: 0,63991.

4.2. Aplicación del método Análisis Jerárquico (AHP)

Luego de definir cada uno de los criterios de selección, las alternativas y realizar la construcción del modelo en el apartado anterior. Consecutivamente, se realiza la aplicación del método de las jerarquías analíticas (Método AHP), utilizando como herramienta el software Super Decisions para el desarrollo del método.

Con el objeto de mostrar el método AHP, se desarrolla, un ejemplo de aplicación para la selección de un automóvil híbrido. Este método, fue explicado, en el apartado 3.1.10. del capítulo 3.

² Supóngase una matriz cuadrada de dimensión $n \times n$. Se puede hallar un vector ω (vector propio) de dimensión n , tal que $A^* \omega = \lambda^* \omega$, donde λ es el valor propio. Si existe consistencia, es decir si la matriz A cumple que $a_{ik} = a_{ij} * a_{jk} \forall i, j, k$, se tiene que $\lambda = n$. Si no existe consistencia (como suele suceder con juicios de valor humanos) se tiene que $A^* \omega = \lambda_{max}^* \omega$ con $\lambda_{max} \geq n$, y la diferencia entre ambos valores indica la inconsistencia (Domenech, 2013).

A continuació, se presenten cada uno de los pasos para la aplicación del método AHP con el uso del programa Super Decisions;

- ❑ **Paso 1:** Se define la estructura jerárquica de nuestro problema, en donde el primer nivel de la estructura corresponde al objetivo del problema, el segundo a los criterios, el tercero a los subcriterios y el cuarto a las alternativas posibles de elección (Ver Figura 26).

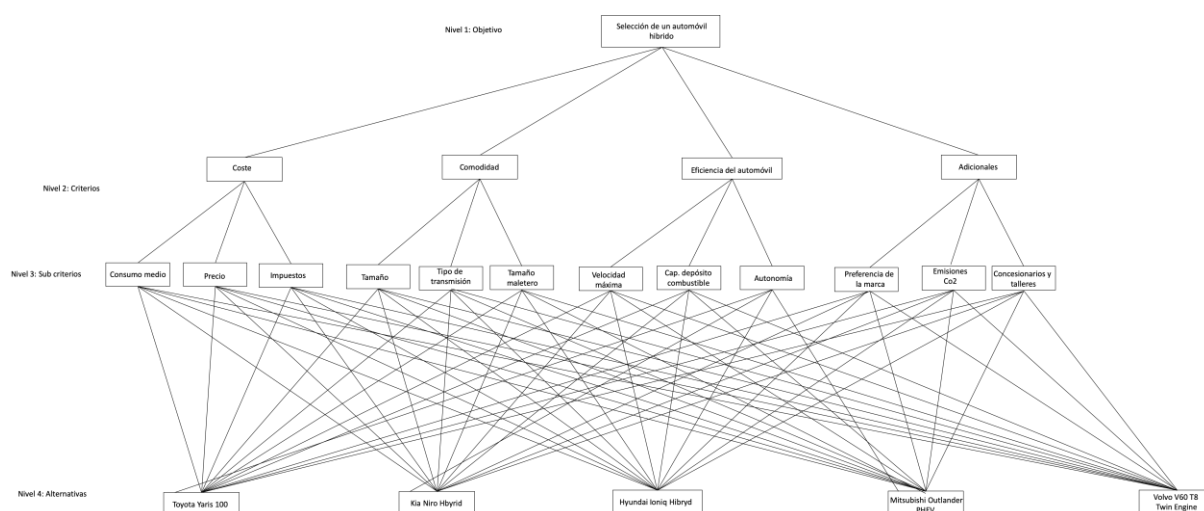


Figura 26. Alternativas para la selección de un automóvil Híbrido: Representación jerárquica

Fuente: Elaboración propia

- ❑ **Paso 2:** Una vez que ya se define la estructura jerárquica del problema, el centro decisor establece una comparación de valores subjetivos por pareja para dar el peso o importancia relativa de criterios, subcriterios y alternativas. Para el segundo nivel jerárquico los valores emitidos por el centro decisor se ven reflejados en la tabla 27.

AHP	Coste	Comodidad	Eficiencia del automóvil	Adicionales
Coste	1	1/2	1/5	1
Comodidad	2	1	1/2	2
Eficiencia del automóvil	5	2	1	2
Adicionales	1	1/2	1/2	1

Tabla 27. Matriz de comparación por parejas para el nivel jerárquico 2

Fuente: Elaboración propia

Selección de un automóvil híbrido.

Al interpretar los elementos de la matriz de decisión de la tabla número se tiene que el centro decisor considera que el criterio eficiencia del automóvil es 5 veces más importante que el criterio coste, 2 veces más importante que el criterio comodidad y dos veces más importante que el criterio “adicionales”.

- ❑ **Paso 3:** Una vez determinada la matriz de comparaciones por pares, se determinan los pesos relativos para el nivel jerárquico 2, se pueden obtener de distintas maneras. En este caso para obtenerlos se usa el programa Super Decisions.

En la tabla 28, se recogen los valores obtenidos de los pesos relativos para el nivel jerárquico 2:

Criterios	Pesos W
Coste	0.35971
Comodidad	0.39741
Eficiencia del automóvil	0.19242
Adicionales	0.05046

Tabla 28. Pesos relativos para el nivel jerárquico 2

Fuente: Elaboración propia

- ❑ **Paso 4:** Una vez determinados los pesos relativos para el nivel jerárquico 2, nuevamente se realiza la interacción con el centro decisor (paso 2), pero para el nivel jerárquico 3, donde el centro decisor tendrá que mostrar sus preferencias confrontando cada criterio con cada subcriterio.

Las 4 matrices de comparación para el nivel jerárquico 3, están recogidas en la tabla 29. Nuevamente la interpretación de los elementos de las matrices es evidente para la tabla 29. El consumo medio es igual de importante que el precio y 3 veces más importante que los impuestos.

AHP	CM	P	I
CM	1	1	3
P	1	1	3
I	1/3	1/3	1

a) Coste

AHP	T	TT	TM
T	1	1	3
TT	1	1	3
TM	1/3	1/3	1

b) Comodidad

AHP	VM	CDC	A
VM	1	6	1
CDC	1/6	1	1/6
A	1	6	1

c) Eficiencia del automóvil

AHP	M	E	CEC
M	1	1/3	2
E	3	1	7
CEC	1/2	1/7	1

d) Adicionales

Tabla 29. Matriz de comparaciones para el nivel jerárquico 3

Fuente: Elaboración propia

- ❑ **Paso 5:** Se determinan los pesos relativos para el nivel jerárquico 3 con el mismo procedimiento utilizado en el paso 3.

En la tabla 30, se presenta la estimación de pesos relativos obtenidos para el nivel jerárquico 3 con el programa Super Decisions:

Subcriterios	Pesos W
CM	0.42857
P	0.42857
I	0.14286

a) Coste

Subcriterios	Pesos W
T	0.42857
TT	0.42857
TM	0.14286

b) Comodidad

Subcriterios	Pesos W
VM	0.15706
CDC	0.24931
A	0.59363

c) Eficiencia del coche

Subcriterios	Pesos W
M	0.10251
E	0.68165
CEC	0.21584

d) Adicionales

Tabla 30. Estimación de pesos relativos para el nivel jerárquico 3

Fuente: Elaboración propia

- ❑ **Paso 6:** Una vez determinados los pesos relativos para el nivel jerárquico 3, nuevamente se realiza la interacción con el centro decisor (paso 2), pero para el nivel jerárquico 4, donde el

Selección de un automóvil híbrido.

centro decisor tendrá que mostrar sus preferencias confrontando cada subcriterio con cada alternativa. Nuevamente, la lectura de las matrices es obvia, se puede ver que para el subcriterio consumo medio la alternativa Toyota es igual de importante que Kia y 3 veces más importante que la alternativa Hyundai.

A continuación, se presentan las 12 matrices de comparación para el nivel jerárquico 4 (Ver tabla 31):

AHP	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TYH	1	1/2	3	1/6	1/6
KNH	2	1	2	1/5	1/5
HIH	1/3	1/2	1	1/7	1/7
MO	6	5	7	1	1
V60	6	5	7	1	1

a) Consumo Medio.

AHP	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TYH	1	2	3	5	9
KNH	1/2	1	2	3	8
HIH	1/3	1/2	1	2	4
MO	1/5	1/3	1/2	1	4
V60	1/9	1/8	1/4	1/4	1

b) Precio

AHP	TYH	OPX	SL	MO	V60
TYH	1	1	1	1/5	1/5
KNH	1	1	1	1/5	1/5
HIH	1	1	1	1/5	1/5
MO	5	5	5	1	1
V60	5	5	5	1	1

c) Impuestos

AHP	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TYH	1	1/4	1/3	1/9	1/9
KNH	4	1	2	1/7	1/3
HIH	3	1/2	1	1/8	1/3
MO	9	7	8	1	4
V60	9	3	3	1/4	1

d) Tamaño

AHP	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TYH	1	4	1	1	1
KNH	1/4	1	1/4	1/4	1/4
HIH	1	4	1	1	1
MO	1	4	1	1	1
V60	1	4	1	1	1

e) Tipo de transmisión

AHP	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TYH	1	1/6	1/7	1/8	1/9
KNH	6	1	1/2	1/5	1/4
HIH	7	2	1	1/4	1/4
MO	8	5	4	1	1/2
V60	9	4	4	2	1

f) Tamaño maletero

AHP	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TYH	1	2	1/2	3	9
KNH	1/2	1	1/3	5	6
HIH	2	3	1	5	8
MO	1/3	1/5	1/5	1	4
V60	1/9	1/6	1/8	1/4	1

AHP	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TYH	1	1/7	1/6	1/9	1/9
KNH	7	1	2	1/4	1/4
HIH	6	1/2	1	1/5	1/5
MO	9	4	5	1	1
V60	9	4	5	1	1

g) Velocidad máxima

h) Capacidad deposito de combustible

AHP	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TYH	1	1/2	1/8	1/9	1/5
KNH	2	1	1/6	1/8	1/6
HIH	8	6	1	1/2	5
MO	9	8	2	1	3
V60	5	6	1/5	1/3	1

AHP	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TYH	1	9	8	2	1
KNH	1/9	1	1/2	1/6	1/8
HIH	1/8	2	1	1/3	1/6
MO	1/2	6	3	1	1/2
V60	1	8	6	2	1

i) Autonomía.

j) Preferencia de la marca

AHP	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TYH	1	1/3	1/9	1/7	1/7
KNH	3	1	1/8	1/6	1/5
HIH	9	8	1	5	4
MO	7	6	1/5	1	2
V60	7	5	1/4	1/2	1

AHP	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TYH	1	1/5	2	4	2
KNH	5	1	5	5	5
HIH	1/2	1/5	1	4	1
MO	1/4	1/5	1/4	1	1/4
V60	1/2	1/5	1	4	1

k) Emisiones CO2

l) Concesionarios y talleres oficiales

Tabla 31. Matriz de comparación para el nivel jerárquico 4

Fuente: Elaboración propia

❑ **Paso 7:** Nuevamente, se realiza el paso 3 para determinar los pesos relativos para el nivel jerárquico 4.

En la tabla 32, se presentan los pesos relativos obtenidos para el nivel jerárquico 4, que se obtienen con el programa de Super Decisions.

Alternativas	Pesos W
TYH	0.07508
KNH	0.09534
HIH	0.04449
MO	0.39255
V60	0.39255

a) Consumo medio.

Alternativas	Pesos W
TYH	0.44341
KNH	0.27093
HIH	0.15235
MO	0.09760
V60	0.03571

b) Precio

Alternativas	Pesos W
TYH	0.29412
KNH	0.29412
HIH	0.29412
MO	0.05882
V60	0.05882

c) Impuestos

Alternativas	Pesos W
TYH	0.03231
KNH	0.10019
HIH	0.06925
MO	0.57554
V60	0.22271

d) Tamaño

Alternativas	Pesos W
TYH	0.23529
KNH	0.23529
HIH	0.05882
MO	0.23529
V60	0.23529

e) Tipo de transmisión.

Alternativas	Pesos W
TYH	0.02812
KNH	0.09337
HIH	0.13156
MO	0.32916
V60	0.41778

f) Tamaño maletero

Selección de un automóvil híbrido.

Alternativas	Pesos W
TYH	0.26675
KNH	0.20200
HIH	0.41975
MO	0.07972
V60	0.03178

g) Velocidad Máxima.

Alternativas	Pesos W
TYH	0.03318
KNH	0.04664
HIH	0.34861
MO	0.42037
V60	0.15120

i) Autonomía

Alternativas	Pesos W
TYH	0.02977
KNH	0.05115
HIH	0.54366
MO	0.21473
V60	0.16068

k) Emisiones CO₂

Alternativas	Pesos W
TYH	0.02755
KNH	0.13160
HIH	0.08963
MO	0.37561
V60	0.37561

h) Capacidad depósito de combustible

Alternativas	Pesos W
TYH	0.37464
KNH	0.03596
HIH	0.05901
MO	0.18632
V60	0.34407

j) Preferencia de la marca

Alternativas	Pesos W
TYH	0.26010
KNH	0.53627
HIH	0.11794
MO	0.04880
V60	0.11794

l) Concesionarios y talleres.

Tabla 32. Estimación de pesos relativos para el nivel jerárquico 4

Fuente: Elaboración propia

Selección de un automóvil híbrido.

- ❑ **Paso 8:** Una vez obtenidos los estimadores de los pesos para los niveles jerárquicos 2, 3 y 4, se calcula los pesos globales para todos los niveles jerárquicos como fue mencionado en el apartado 3.1.10. del capítulo 3.

A continuación, se presentan en la tabla 33 los pesos globales obtenidos a través del programa Super Decisions.

Alternativas	Pesos W
TYH	0.182091
KNH	0.137135
HIH	0.169605
MO	0.301595
V60	0.209574

Tabla 33. Determinación de los pesos globales Fuente: Elaboración propia

En conclusión, las preferencias del centro decisor por medio del método AHP lleva a considerar la alternativa Mitsubishi Outlander PHEV como la mejor opción.

4.3. Aplicación de la Programación compromiso

A continuación, se explica detalladamente, paso a paso, la metodología, para aplicar la programación compromiso, basado en los datos extraídos de la tabla 26 (Especificaciones de las alternativas). Este método, fue explicado, en el apartado 3.1.6. del capítulo 3.

- ❑ **Paso 1:** Se normalizan los datos de la tabla 26, ya que están medidos en unidades diferentes.

Para ello, se utiliza el modelo (17) del apartado 3.1.6 del capítulo 3. A continuación, se presentan los valores normalizados en la tabla 34, que se calculan con el programa de Excel:

Sub criterios	Alternativas				
	Toyota Yaris 100 hybrid	Kia Niro	Hyundai Ioniq	Mitsubishi Outlander PHEV	Volvo V60 T8 Twin Engine
Consumo medio	0,77778	0,74074	1,00000	0,00000	0,00000
Precio	0,00000	0,14865	0,48649	0,46063	1,00000
Impuestos	1,00000	1,00000	1,00000	0,00000	0,00000
Tamaño	1,00000	0,56054	0,60244	0,00000	0,44080
Tipo de transmisión	0,00000	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Tamaño Maletero	1,00000	0,41975	0,35391	0,12757	0,00000
Velocidad Máxima (km/h)	0,16667	0,17949	0,00000	0,55128	1,00000
Capacidad depósito de combustible	1,00000	0,34091	0,38636	0,00000	0,00000
Autonomía (km)	1,00000	0,98077	0,03846	0,00000	0,17308
Marca	0,00000	0,50000	1,00000	0,25000	0,50000
Emisiones Co2	1,00000	0,85714	0,25000	0,00000	0,03571
Concesionarios y talleres oficiales	0,80000	0,00000	0,86667	1,00000	0,86667

Tabla 34. Datos normalizados

Fuente: Elaboración propia

Selección de un automóvil híbrido.

En la tabla 34, para calcular el valor normalizado del subcriterio consumo medio para la alternativa Toyota Yaris, se calcula el valor absoluto de: La resta del valor ideal menos el valor de la casilla correspondiente entre el valor ideal menos el valor anti ideal (Ver modelo 17). Para el subcriterio consumo medio, el valor ideal es 1,80, ya que es el automóvil que menos consume y el anti ideal 4,50 siendo el automóvil que más consume (Ver tabla 26). Por ejemplo, el valor normalizado es: $1,80 - 3,90 / 1,80 - 4,50 = 0.777$. Por otro lado, se puede observar que en la tabla 34, los valores oscilan entre 0 y 1. Esto significa que, cuando un objetivo alcanza su valor ideal, el valor normalizado es cero, de lo contrario, si el objetivo tiene el valor de 1, ha alcanzado el valor anti ideal.

Por ejemplo, el subcriterio precio con respecto a la alternativa Volvo V60 el valor normalizado es 1 y con respecto a Toyota el valor normalizado es 0. Así mismo, la alternativa Volvo V60 alcanzó su valor anti ideal porque es el automóvil con mayor precio y la alternativa Toyota Hybrid alcanzó su valor ideal, por ser el automóvil con menor precio. (Ver tabla 26).

- ❑ **Paso 2:** Se calcula el peso global para cada subcriterio, con el programa de Excel, a partir de los pesos relativos de cada criterio y subcriterio, que se obtuvieron en el método AHP (Ver tabla 28 y 30).

A continuación, se presenta la tabla 35, con los pesos relativos de cada criterio, subcriterio y los pesos globales de cada subcriterio:

Criterios	Pesos W	Sub criterios	Pesos W	W global para cada subcriterio
Coste	0,35971	Consumo medio	0,42857	0,15416
		Precio	0,42857	0,15416
		Impuestos	0,14286	0,05139
Comodidad	0,39741	Tamaño (cm)	0,42857	0,17032
		Tipo de transmisión	0,42857	0,17032
		Tamaño Maletero (Litros)	0,14286	0,05677
Eficiencia del automovil	0,19242	Velocidad Máxima (km/h)	0,15706	0,03022
		Capacidad depósito de combustible	0,24931	0,04797
		Autonomía (km)	0,59363	0,11423
Adicionales	0,05046	Marca	0,10251	0,00517
		Emisiones Co2(g/km)	0,68165	0,03440
		Concesionarios y talleres oficiales	0,21584	0,01089

Tabla 35. Pesos relativos de cada criterio, subcriterio y los pesos globales de cada subcriterio.

Fuente: Elaboración propia

Para obtener el peso global de cada subcriterio, se multiplica el peso relativo de cada criterio, multiplicado por el peso relativo del subcriterio correspondiente. Así, el peso global del subcriterio consumo medio es: $0.35971 \times 0,42857 = 0.15416$ y el peso global del subcriterio velocidad máxima es: $0,19242 \times 0,15706 =$

Selección de un automóvil híbrido.

0,03022. Se observa que, la columna de los pesos globales para cada subcriterio, la suma de ellos es igual a 1.

- ❑ **Paso 3:** Se calcula el punto más próximo para la métrica $p = 1$ (Ver modelo 19) y para la métrica $p = \infty$ (Ver modelo 20). Por último, se calcula el promedio de los dos valores obtenidos.

A continuación, se presenta la tabla 36 con la solución compromiso o punto más próximo al ideal.

Sub criterios	Toyota Yaris 100 hybrid	Kia Niro	Hyundai Ioniq	Mitsubishi Outlander PHEV	Volvo V60 T8 Twin Engine
Consumo medio	0,11990	0,11419	0,15416	0,00000	0,00000
Precio	0,00000	0,02292	0,07500	0,07101	0,15416
Impuestos	0,05139	0,05139	0,05139	0,00000	0,00000
Tamaño (cm)	0,17032	0,09547	0,10261	0,00000	0,07508
Tipo de transmisión	0,00000	0,17032	0,00000	0,00000	0,00000
Tamaño Maletero (Litros)	0,05677	0,02383	0,02009	0,00724	0,00000
Velocidad Máxima (km/h)	0,00504	0,00542	0,00000	0,01666	0,03022
Capacidad depósito de combustible	0,04797	0,01635	0,01853	0,00000	0,00000
Autonomía (km)	0,11423	0,11203	0,00439	0,00000	0,01977
Marca	0,00000	0,00259	0,00517	0,00129	0,00259
Emissiones CO ₂ (g/km)	0,03440	0,02948	0,00860	0,00000	0,00123
Concesionarios y talleres oficiales	0,00871	0,00000	0,00944	0,01089	0,00944
L_1	0,60873	0,64399	0,44938	0,10710	0,29248
L_∞	0,17032	0,17032	0,15416	0,07101	0,15416
L	0,38952	0,40716	0,30177	0,08906	0,22332

Tabla 36. Solución compromiso

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 36, el valor de cada casilla representa la multiplicación del valor normalizado de la casilla correspondiente (Ver tabla 34) por el peso global de cada subcriterio (Ver tabla 35). Por ejemplo: a) el cálculo del valor de la casilla del subcriterio consumo medio respecto a Toyota es: $0,77778 \times 0,15416 = 0,11990$. b) El cálculo del valor de la casilla del subcriterio Emisiones CO₂ con respecto a Hyundai es: $0,25000 \times 0,03440 = 0,00860$. El valor de L_1 se obtuvo aplicando el modelo 19 del apartado 3.1.6. del capítulo 3. Para calcularlo, se suman todos los valores obtenidos de cada subcriterio para cada alternativa. Por ejemplo, L_1 para alternativa Toyota es: 0,60219 y el valor de L_∞ , es la desviación más grande entre los valores del subcriterio (Ver modelo 20). Para este caso el valor más grande es: 0,17032. Por último, se calcula el promedio de L_1 y L_∞ ($(0,60219 + 0,17032) / 2$) = 0,38626 y así tener una mejor aproximación al punto ideal entre las dos métricas. La L más pequeña es la solución más próxima al punto ideal. Finalmente, se obtuvo que la mejor alternativa es el Mitsubishi Outlander PHEV.

Por último, se repitió la aplicación del método AHP y programación compromiso para 10 personas. Se muestran los resultados en el capítulo 4.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

En este capítulo, se muestran los resultados obtenidos al aplicar el método AHP y programación compromiso para la selección de un automóvil híbrido. Para ello, se realizó, una primera aplicación, donde se detalló, paso a paso las metodologías de los enfoques mencionados. Posteriormente, se realizó una encuesta a 10 personas escogidas aleatoriamente, sin importar la edad, si han utilizado coches convencionales o si tienen conocimientos acerca de los coches híbridos. Todo esto, con el fin de recolectar información acerca de las preferencias del centro decisor (usuario) con respecto a los criterios y subcriterios de selección para el método AHP. Asimismo, se preguntó acerca de las preferencias del usuario en cuanto al tipo de transmisión y marca, para poder obtener los valores de los mismo en una escala cuantitativa. Y así, poder aplicar la programación compromiso, ya que como se mencionó en el apartado 4.1.3 es necesario que todos los criterios estén medidos en una escala cuantitativa. Una vez recogida esta información, se puede hacer uso de las herramientas de decisión para corroborar su correcto funcionamiento con las metodologías mencionadas anteriormente, pero esta vez, aplicándola en 10 personas distintas. Dicha encuesta, se ejecutó a cada una de las personas. La cual, se dividió en dos partes. La primera, para recolectar la información para el método AHP y la segunda para obtener la información necesaria para la programación compromiso. Para ello, la primera parte de la encuesta se dividió en dos apartados. En el primero, se pidió rellenar una matriz para comparar por parejas los criterios del nivel jerárquico 2 (Coste, Comodidad, Eficiencia del automóvil y adicionales) en una escala del 1 al 9 (Ver tabla 14). Donde, el encuestado únicamente debe rellenar los 6 valores de la parte superior de la diagonal principal. Dicha diagonal, está compuesta por el valor 1, ya que la importancia de un criterio con respecto a si mismo es siempre igual. Por otro lado, la parte inferior son los valores inversos de la parte superior, ya que se trata de una matriz simétrica. De esta manera, si a es mucho más importante que b , b es mucho menos importante que a . En el segundo, nuevamente, se pidió rellenar 4 matrices de la misma manera que la anterior, pero para los subcriterios del nivel jerárquico 3. En esta, solo se pide rellenar los 3 valores de la parte superior de la matriz, puesto que es una matriz 3×3 . Para la comparación de alternativas en el nivel jerárquico 4, no se pidió juicio del usuario, ya que notoriamente, la mayoría de las personas encuestadas, no han probado estos coches. Así que, para la comparación por pares del nivel jerárquico 4, se utilizaron los pesos emitidos en la primera aplicación del método AHP. A excepción, para los subcriterios tipo de transmisión y preferencia de la marca, que, si se utilizaron las ponderaciones emitidas por los usuarios, pero no fue necesario rellenar las matrices, debido a que con la segunda parte de la encuesta se pueden obtener estos valores. La segunda parte de la encuesta también tiene dos apartados. En el primero, se pidió dar una puntuación para el subcriterio de selección

Selección de un automóvil híbrido.

tipo de transmisión y en el segundo para valorar la preferencia de cada marca. Para el tipo de transmisión, se valora con un 1 si es menos preferido y un 5 más preferido, ya que solo existen 2 opciones, cambio automático o manual, por tanto, era una manera simple de valorarlos y obtener valores cuantitativos. Entonces, si las personas preferían un coche automático, les dieron un valor de 5 y 1 al manual. De lo contrario, lo valoran con 5 a la transmisión manual y un 1 a la transmisión automática. Para la preferencia de cada una de las marcas, se midió en una escala del 1 al 5, donde 1 es nada preferida, 2 poco preferida, 3 medianamente preferida, 4 muy preferida y 5 extremadamente preferida. Así, para un mismo usuario, la marca Toyota puede tener un valor de 5, el Kia Niro un valor de 3, el Hyundai un valor de 2, el Volvo un valor de 5 y, por último, el Mitsubishi un valor de 4. En ese caso, los valores ideales son el coche Toyota y Volvo y el anti ideal el Hyundai por tener el menor valor entre las 5 alternativas.

Por otro lado, es importante resaltar que cuando se realizaron las encuestas, los resultados obtenidos en la primera parte no fueron adecuados al introducirlos en el programa de Super Decisions. Puesto que, los valores de la ratio de consistencia fueron excesivamente muy elevados basado en el criterio de Saaty (1980), que dice que una matriz es consistente si tiene un Ratio de consistencia $\leq 0,1$. Así, para los criterios del segundo nivel no son consistentes y para los subcriterios del tercer nivel tampoco lo son.

Estos resultados, pueden parecer asombrosos, ya que se supone que el método AHP, está diseñado para trata de disminuir y eliminar estas inconsistencias de las irracionalidades del humano. Lo que ocurre, es que la comparación por pares para los encuestados es confusa debido a que no se encuentran familiarizados ni están acostumbrados a utilizar esta herramienta. Por tanto, para que los resultados pudieran ser analizados correctamente, se alteraron las respuestas de los encuestados, para disminuir la Ratio de consistencia, y llevarlo a uno aceptable. Para ello, se revisó cada matriz que rellenaron, se adaptó a las preferencias del usuario, pero de una manera razonable y así obtener la ratio de consistencia menor a 0,1. Los resultados obtenidos, se presentan a continuación:

5.1. Resultados método AHP

En la primera aplicación del método AHP se obtuvo el siguiente resultado:

Alternativas	Pesos W
TYH	0.132184
KNH	0.143471
HIH	0.114652
MO	0.296379
V60	0.313313

Tabla 37. Resultado Análisis Jerárquico

Fuente: Elaboración propia

Selección de un automóvil híbrido.

Se puede observar en la tabla 37, que el primer resultado obtenido en la aplicación del Análisis Jerárquico, nos lleva a decidir, que la mejor alternativa para la adquisición de un automóvil híbrido basados en los criterios seleccionados, es el Volvo Twin Engine V60 con un peso de 0,313313(31%), seguido, el Mitsubishi 0.296379 (29,63%), luego, el Toyota Yaris 0.132184 (13,21%), posteriormente, el Kia Niro 0.143471 (14,34%) y por último, el Hyundai Ioniq 0.114652 (11,46%).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las encuestas:

1)

Alternativas	Pesos W
TYH	0.109394
KNH	0.134055
HIH	0,214677
MO	0,333815
V60	0.208059

2)

Alternativas	Pesos W
TYH	0,219016
KNH	0,194268
HIH	0,197149
MO	0.209074
V60	0,180494

3)

Alternativas	Pesos W
TYH	0,176163
KNH	0,138258
HIH	0,113855
MO	0,309731
V60	0,310200

4)

Alternativas	Pesos W
TYH	0,320621
KNH	0,077297
HIH	0,138001
MO	0,287057
V60	0,177024

5)

Alternativas	Pesos W
TYH	0,167997
KNH	0,167768
HIH	0,112843
MO	0,302539
V60	0,248853

6)

Alternativas	Pesos W
TYH	0,246630
KNH	0,173380
HIH	0,156861
MO	0,238872
V60	0,184258

7)

Alternativas	Pesos W
TYH	0,160186
KNH	0,106643
HIH	0,276742
MO	0,206775
V60	0,249653

8)

Alternativas	Pesos W
TYH	0,130311
KNH	0,120076
HIH	0,230949
MO	0,314280
V60	0,204383

9)

Alternativas	Pesos W
TYH	0,174569
KNH	0,177035
HIH	0,305257
MO	0,189184
V60	0,153956

10)

Alternativas	Pesos W
TYH	0,095537
KNH	0,111692
HIH	0,168735
MO	0,357214
V60	0,266822

Tabla 38. Resultados encuestas Análisis Jerárquico (AHP)

Fuente: Elaboración propia

Selección de un automóvil híbrido.

En la tabla 38, se pueden observar los resultados obtenidos a través de las encuestas realizadas, al aplicar el método AHP. La respuesta sombreada con azul es la alternativa de automóvil óptima. El cuál, resultó para cada persona, según el peso que le haya dado a cada criterio, subcriterio y alternativa, como se mencionó en el capítulo anterior.

5.2. Resultados método programación compromiso

Posteriormente, en la primera aplicación de la programación compromiso, se obtuvo el siguiente resultado:

	THY	KNH	HIH	MO	V60
L1	0,75345	0,68163	0,77284	0,26179	0,29624
L^∞	0,20556	0,18677	0,18430	0,11341	0,09457
L	0,47951	0,43420	0,47857	0,18760	0,19540

Tabla 39. Resultado a través del Método Programación Compromiso

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 39, se aprecia que, según los resultados obtenidos, el Mitsubishi es la mejor alternativa clasificada, después el Volvo V60, seguido del Kia Niro, posteriormente, el Hyundai Ioniq y, por último, el Toyota Yaris.

A continuación, en la tabla 40, se muestran los resultados obtenidos de las encuestas, aplicando el método Programación Compromiso.

1)	THY	KNH	HIH	MO	V60
L1	0,80150	0,55390	0,40142	0,34620	0,29435
L^∞	0,37762	0,21167	0,22749	0,16572	0,16645
L	0,58956	0,38279	0,31445	0,25596	0,23040

2)	THY	KNH	HIH	MO	V60
L1	0,76549	0,64463	0,63038	0,12822	0,27957
L^∞	0,30003	0,30003	0,30003	0,05104	0,10908
L	0,53276	0,47233	0,46520	0,08963	0,19433

3)	THY	KNH	HIH	MO	V60
L1	0,67862	0,55603	0,71604	0,14309	0,17714
L^∞	0,26912	0,25631	0,34602	0,11173	0,05306
L	0,47387	0,40617	0,53103	0,12741	0,11510

Selección de un automóvil híbrido.

4)	THY	KNH	HIH	MO	V60
L1	0,31369	0,84132	0,63683	0,23361	0,42360
L ∞	0,09406	0,57350	0,43013	0,14338	0,28675
L	0,20388	0,70741	0,53348	0,18849	0,35517

5)	THY	KNH	HIH	MO	V60
L1	0,88676	0,81212	0,20154	0,55133	0,23244
L ∞	0,48405	0,48405	0,07916	0,48405	0,11300
L	0,68541	0,64809	0,14035	0,51769	0,17272

6)	THY	KNH	HIH	MO	V60
L1	0,79256	0,75900	0,67260	0,20228	0,23011
L ∞	0,33075	0,33075	0,33075	0,10077	0,07211
L	0,56166	0,54488	0,50167	0,15153	0,15111

7)	THY	KNH	HIH	MO	V60
L1	0,69179	0,65822	0,76595	0,10645	0,23011
L ∞	0,33075	0,33075	0,33075	0,03976	0,07211
L	0,51127	0,49449	0,54835	0,07310	0,15111

8)	THY	KNH	HIH	MO	V60
L1	0,77156	0,68579	0,41430	0,36947	0,26351
L ∞	0,28363	0,28363	0,15274	0,28363	0,11176
L	0,52759	0,48471	0,28352	0,32655	0,18764

9)	THY	KNH	HIH	MO	V60
L1	0,90001	0,83063	0,58681	0,22093	0,15211
L ∞	0,37762	0,37762	0,37762	0,12588	0,05800
L	0,63882	0,60413	0,48222	0,17340	0,10505

10)	THY	KNH	HIH	MO	V60
L1	0,83873	0,64932	0,49153	0,06575	0,35370
L ∞	0,27263	0,24294	0,21147	0,02250	0,23703
L	0,55568	0,44613	0,35150	0,04412	0,29536

Tabla 40. Resultados encuestas Programación Compromiso

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 40, se pueden observar los resultados obtenidos a través de las encuestas realizadas a 10 personas, al aplicar el método programación compromiso. La respuesta sombreada con azul es la L más pequeña, es decir, la alternativa de automóvil, que más se acerca a la solución óptima que resultó para cada persona.

5.3. Análisis de resultados

Para analizar los datos obtenidos a través de los dos métodos, se recogieron en una gráfica de tipo circular en la figura 27 y 28, ya que es una manera de visualizar cuál es el coche que más se repite según las respuestas dadas por los encuestados. De esta manera, se puede observar fácilmente, la diferencia que pueda existir entre los resultados obtenidos a través de los dos métodos.

A continuación, se presenta la gráfica de resultados de los encuestados a través del método AHP

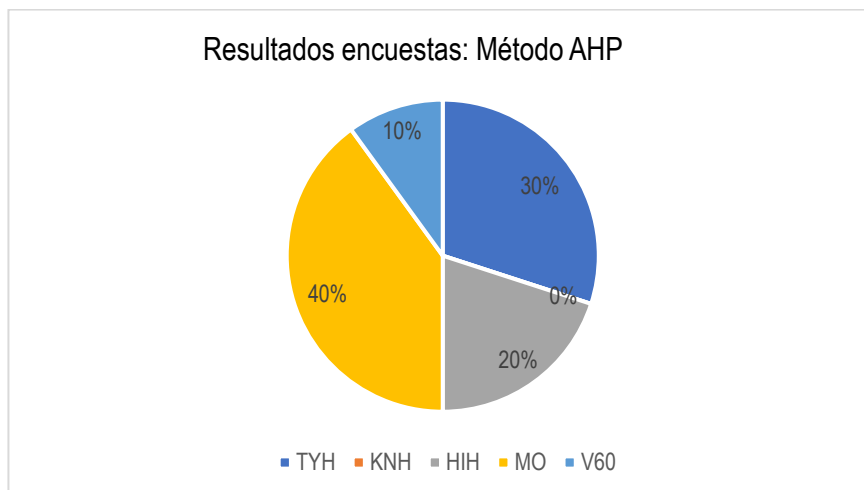


Figura 27. Gráfica de resultados de encuestas Método AHP

Fuente: Elaboración propia

En la figura 27, se muestra una gráfica que recoge todos los resultados obtenidos a través de las encuestas por el método del análisis Jerárquico. Se puede observar que la alternativa que más se repite en los resultados con un 40% es La Mitsubishi Outlander PHEV, el Toyota Yaris 100 Hybrid con un 30%, el Hyundai Ioniq Hybrid con un 20%, el Volvo V60 Twin Engine con un 10% y la alternativa Kia Niro Hybrid, no resulta como alternativa óptima para ninguno de los encuestados.

A continuación, se presenta la gráfica de resultados de los encuestados a través de la programación compromiso:

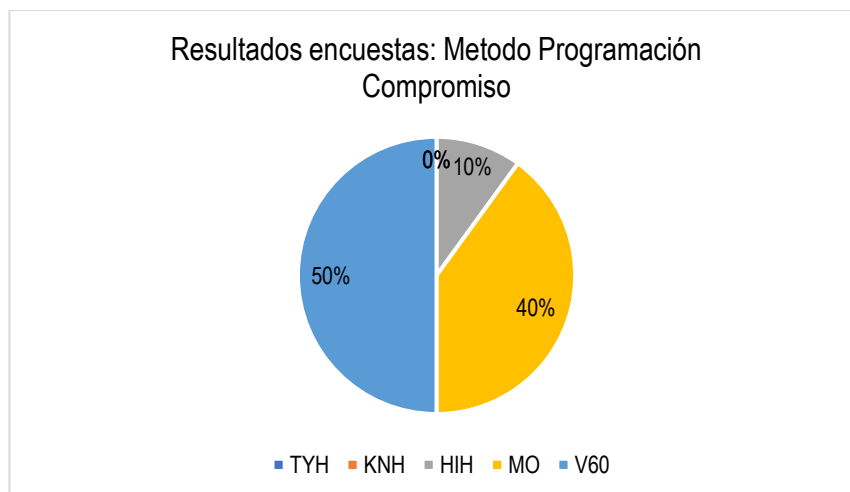


Figura 28. Gráfica de resultados de encuestas: Método Programación Compromiso

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la figura 28, se recogen los porcentajes de los resultados obtenidos en las encuestas, con la aplicación del método Programación Compromiso. Se observa, que la alternativa que más repite como automóvil más próximo al ideal es: a) Volvo V60 Twin Engine 50 % b) Mitsubishi Outlander PHEV 40% c) Hyundai Ioniq 10 %.

Finalmente, al observar las gráficas de la figura 27 y 28, se puede observar, que, los resultados obtenidos a través de la programación compromiso, tienen una variabilidad menor. De lo contrario, los resultados arrojados con el análisis jerárquico tienen una mayor variación. La poca variabilidad de resultados con la programación compromiso, reside en que no se toma en cuenta todas las decisiones del centro decisor; Por ejemplo, a través de la programación compromiso, ya está predeterminado que se elige el automóvil con menor precio. Igualmente, esto sucede para los otros criterios de comparación, según sea el caso, si se quiere lo mayor o menor del criterio correspondiente. En cambio, el método AHP, si al comparar el precio de dos automóviles se observa que la diferencia entre uno y otro es de 2000 euros. El usuario le puede dar un mayor peso a la alternativa que tiene el precio más elevado, en las comparaciones del nivel jerárquico 4.

CAPÍTULO 6. PRESUPUESTO DEL ESTUDIO

A continuación, en este capítulo se detalla el coste económico que ha supuesto el desarrollo de la tesis. Para ello, en el primer apartado se detalla el coste de personal. Mas adelante, en el segundo apartado se exponen los costes asociados al material. Por último, se detallan los costes indirectos asociados al desarrollo del estudio.

Primero, se debe tomar en cuenta, que el alumno, ha realizado su trabajo en duración de 5 meses (20 semanas), de los cuales se trabajaron de lunes a viernes, en una jornada de 6 horas, dando un total de 30 horas/semana aproximadamente. Asimismo, de esas 20 semanas, se descuentan, los días que no se han trabajado por vacaciones, calculándose un total de 15 semanas, que corresponden a 450 horas de carga de trabajo.

Hay que agregar, que, para la realización de este estudio, se ha necesitado la supervisión de un tutor, que implican más horas empleadas en el trabajo. También, se ha calculado el coste de los materiales y equipos utilizados.

6.1 Coste Total del estudio

6.1.1. Costes de personal

En este apartado, se calcula el coste de personal, tomando en cuenta las horas empleadas por el estudiante, mencionadas anteriormente y las horas dedicadas por el tutor a la supervisión del trabajo.

Concepto	Tiempo empleado	Coste Unitario	Coste total
Ingeniero Junio (estudiante)	450 h	25 €/h	11.250€
Ingeniero Manager (Tutor)	15 h	40 €/h	600€
		Coste Total	11.850€

Tabla 41. Costes asociados al personal

Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Costes de material

A continuación, se detallan los materiales y equipos utilizados, para el desarrollo del trabajo. Para calcular, el coste asociado al ordenador. Se calcula, la amortización en base a su vida útil:

Concepto	Unidades	Coste Unitario	Coste total
Impresiones	172	0,15 €	25,8€
Libro	-	24,70 €	24,70€
Ordenador MacBook*	-	-	80€
		Coste Total	130,5€

Tabla 42. Costes asociados al material

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de amortización anual del ordenador, según la vida útil:

Concepto por amortizar	Vida Útil	Valor	Amortización ³	Amortización Anual final
Ordenador Mac book	4 años	1000 €	20% a 10 años	8% a 4 años

Tabla 43. Amortización anual según la vida útil Fuente: Elaboración propia

6.1.3. Costes indirectos

En este apartado, se exponen aquellos costes que no pueden ser asociados a un proceso en específico en el desarrollo de la tesis, pero se deben considerar los gastos asociados a la luz, internet y transporte que se han utilizado. A continuación, se presentan detalladamente.

Concepto	Unidades	Coste Unitario	Coste total
Consumo de energía	-	300 kWh x 0,1584 €/kWh	47,52 €
Internet	450 h	0,8 €/h	360 €
Transporte	15 viajes	1,135/ viaje	17,025 €
		Coste Total	424,545 €

Tabla 44. Otros costes asociados Fuente: Elaboración propia

Por último, se recogen, cada uno de los costes anteriores y el coste total en una sola tabla:

³ Según la Tabla de coeficientes de amortización lineal de la agencia tributaria, para el concepto equipos electrónicos.

Concepto	Coste final
Costes de personal	11.850 €
Costes de material	130,5 €
Costes indirectos	424,545 €
Coste total del estudio	12.405,045 €

Tabla 45.Coste total del estudio

Fuente: Elaboración propia

Para culminar, en la tabla 45, se muestra un resumen de los 3 tipos de costes asociados al desarrollo de la tesis y el presupuesto total del estudio. El importe que se detalla ya tiene el IVA incluido.

CAPÍTULO 7. IMPACTO AMBIENTAL

El objetivo de este estudio es de realizar un estudio de aplicación, para la toma de decisión en la selección de un automóvil híbrido. La metodología empleada es una herramienta que permite a las personas a elegir el mejor coche, adaptándose a sus requisitos. Al desarrollarlo y obtener los resultados del mismo, se puede observar que no tiene ninguna incidencia directa en el medio ambiente.

Sin embargo, si alguna compañía decidiera utilizar la herramienta, sería conveniente que tomen en cuenta las emisiones de CO₂ de los ordenadores. En este proyecto se emplean 450 horas aproximadas del uso del ordenador. Esto ayudará a las compañías, a ser más conscientes de alguna implicación ambiental que pudiera ocurrir, en caso de emplear la herramienta.

A continuación, se presenta en la tabla 46 las emisiones de CO₂ asociadas al estudio:

Concepto	Consumo aproximado	Factor emisión de CO ₂ , según consumo eléctrico ⁴	Emisiones de CO ₂ (Kg)
Ordenador Mac book	300kWh	321 g CO ₂ /kWh	96,30 kg CO ₂

Tabla 46. Emisiones de CO₂

Fuente: Elaboración propia

Por último, es importante agregar la contribución del estudio en el aspecto social. La herramienta trae como beneficio facilitar el proceso de toma de decisión para la selección del coche híbrido cuando van a adquirir uno de ellos. En consecuencia, se puede decir, que dicha selección se aproxima a los requerimientos esperados por el usuario.

⁴ Valor del mix de la red eléctrica peninsular estimado en 2018. Fuente: (TFM: Cotas y resolución exacta y no exacta del problema de equilibrado de líneas de montaje de tipo I con tareas con deterioro línea. Autor: Lorena Angulo Gracia)

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo, se expusieron diferentes enfoques multicriterio, que pueden ser utilizados para atacar problemas decisionales en distintas áreas. En el estudio comentado, se logró el objetivo principal, realizar la aplicación de análisis multicriterio, para la toma de decisión en la selección de automóviles híbridos existentes en el mercado, en base a las necesidades de cada cliente potencial, a través del método de anarquías jerárquicas y la programación compromiso.

Así mismo, se realizó una revisión exhaustiva de los enfoques multicriterio para tener un mayor conocimiento y estar familiarizado con ellos. Igualmente, se realizó una revisión bibliográfica acerca de los automóviles híbridos y eléctricos existentes en el mercado, para profundizar los conocimientos acerca de estas nuevas tecnologías. Y, por último, se visitó distintos concesionarios de la ciudad de Barcelona, para obtener información acerca de los criterios de selección para la compra de un automóvil híbrido y el funcionamiento de esta nueva tecnología.

Por otro lado, se puede observar que, en la parte práctica, existe una diferencia entre las dos metodologías. El análisis jerárquico permite ponderar cada criterio, subcriterio y alternativa. De lo contrario, la programación compromiso necesita emplear una técnica para obtener los pesos relativos de los criterios y subcriterios. En cuanto a la parte teórica, la filosofía del método AHP, se basa en realizar comparaciones por parejas entre los distintos niveles jerárquicos. La idea del método es: Si A es mejor que B y C mejor que A, entonces C es mejor que B. El problema reside en que, los seres humanos no son racionales y sus respuestas pueden ser incoherentes. Así, el análisis jerárquico elabora un proceso en donde se reduzcan estas incompatibilidades. En contraste, la programación compromiso emplea una filosofía distinta, no realiza comparaciones por parejas, si no, que supone que existe una solución ideal, la cual es inalcanzable. Debido a esto, el método intenta buscar soluciones eficientes que se acerquen lo más posible a esa solución ideal.

Tomando en cuenta estas consideraciones, no se puede decir, cual método es mejor con respecto a los otros. En el libro de Carlos Romero se menciona al autor Ignizio (1983), que dice: <No existe y probablemente nunca exista un método multicriterio mejor que los demás para cualquier tipo de problema decisional multicriterio>.

Sin embargo, para el caso en estudio, observando los resultados obtenidos de ambos métodos, podemos concluir, que para este caso específicamente es preferible utilizar el método de análisis jerárquico para

Selección de un automóvil híbrido.

la selección de un automóvil, ya que las preferencias de las personas no se limitan, a diferencia como lo hace la programación compromiso. Aun así, cualquiera de los dos métodos funciona correctamente.

Finalmente, para futuros trabajos se recomienda evaluar las condiciones y características del problema a resolver, tal como: cuantos atributos, cuantas restricciones, para determinar cuál es el método multicriterio más conveniente para el caso en particular. Asimismo, sería interesante que los concesionarios indagaran la manera de automatizar este proceso de selección de automóvil híbrido a través de una aplicación o programa. De manera, que cuando los clientes quieran adquirir un coche, lleguen a la tienda, emitan sus preferencias en cuanto a las opciones disponibles. Y, por último, el programa te indique cual es el que te conviene en base a tus necesidades.

CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA

Acosta, J. (2013). Estudio del sistema híbrido, diseño, construcción e implementación de un modelo de conexión de fuerzas propulsoras de transmisión por medio de engranajes planetarios. Disponible en: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/149>. (Consultado:5 de diciembre).

Álvarez, M. (junio, 2019). Programación por Metas. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/14636/Programacion%20por%20Metas.pdf?sequence=1>. (Consultado: 1 de diciembre).

Angulo, L. (2019). Cotas y resolución exacta y no exacta del problema de equilibrado de líneas de montaje de tipo I con tareas con deterioro lineal. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/168952/tfm-lorena-angulo-memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (Consultado: 10 de abril)

Ayuntamiento de Barcelona. Ordenanza Fiscal Reguladora del Impuesto sobre Vehículos de tracción mecánica. Disponible en: <https://ajuntament.barcelona.cat/hisenda/sites/default/files/OF20.1.2es.pdf>. Consultado: 20 de marzo

Baessler, F., Moraga, R. & Cornejo, O. (2008). Introducción de elementos de memoria en el método simulated annealing para resolver problemas de programación multiobjetivo de máquinas paralelas. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ingeniare/v16n3/art06.pdf>. (Consultado 25 de noviembre).

Barrera Doblado, O. & Ros Marín, J, A. (2017). Vehículos Eléctricos e híbridos. Madrid, España. Editorial Paraninfo S.A.

Barros, A. (2015). Estudio y Análisis de la Operación del Inversor del Vehículo Híbrido Toyota Prius A. Disponible en: <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/841/1/T-UIDE-17.pd>. (Consultado:16 de enero).

Berbel Vecino, J. (s/f). Planificación del uso del territorio y programación matemática multicriterio. Disponible en: <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/5569/rea.1.pdf?sequence=1>. (Consultado: 1 de diciembre).

Castillo, M. (2014). MANUAL DEL SOFTWARE SUPERDECISIONS. Disponible en: <https://docplayer.es/5194034-Manual-del-software-superdecisions.html>. (Consultado: 20 de abril).

Selección de un automóvil híbrido.

Catálogo Outlander PHEV (octubre, 2019). Disponible en: https://www.mitsubishi-motors.es/content/dam/mitsubishi-motors-es/es/catalogos/Cat%C3%A1logo_Outlander_PHEV.pdf.

(Consultado: 12 de noviembre 2019)

Componentes del sistema híbrido de Toyota. Disponible en: <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/2017/componentes-sistema-hibrido-toyota>. (Consultado: 15 de febrero)

DGT (Dirección General de Tráfico). Distintivo Ambiental de tu vehículo. Disponible en: <https://sede.dgt.gob.es/es/vehiculos/distintivo-ambiental/>. (Consultado: 20 de marzo).

Domenech Léga, B. (2013). Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/95045/TBDL1de1.pdf>. (Consultado: 16 de enero).

Escobedo Portillo, M., Salas Plata, J. (2008). P. Ch. Mahalanobis y las aplicaciones de su distancia estadística. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2881069>. (Consultado: 1 de diciembre).

El Vehículo eléctrico: elementos principales y su funcionamiento. Disponible en: <https://www.simonelectric.com/blog/el-vehiculo-electrico-elementos-principales-y-funcionamiento>.

Consultado el 9 de febrero.

Especificaciones técnicas Volvo V60. Disponible en: https://www.volvocars.com/es/coches/nuevos-modelos/v60/precio-yespecificaciones/features?gclid=Cj0KCQjwuZDtBRDvARIsAPXfx3Cy6gsGawSrvv3PLRcxc2h34SvSpBXz4cHZsoH-mHTbid8rOLIDbKUaAsyNEALw_wcB&gclid=aw.ds#. (Consultado: 12 de noviembre de 2019).

Especificaciones técnicas Volvo V60. Disponible en: <https://www.km77.com/coches/volvo/v60/2018/estandar/twin-engine/v60-t8-twin-engine-awd-business-plus/datos>. (Consultado: 20 de noviembre).

Especificaciones técnicas de Yaris Hybrid. Disponible en: <https://www.toyota.es/coches/yaris/index/specs>. (Consultado: 10 de noviembre 2019).

Espinos, E. (2019). Los coches Eco y Cero. *Urban la nueva movilidad*. (3). 24-29.

Selección de un automóvil híbrido.

Ferrer, J. & Domínguez, J. E.(s/f). Sistemas de transmisión y frenado. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=IOLEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=transmision+de+un+automovil+&ots=rRtVI0WPY4&sig=U_RsN0gM8pjmJb7ag42JqUvyJ7Q#v=onepage&q&f=false.

(Consultado: 12 de noviembre).

Galán, Rodrigo. (2019). Análisis de vehículos industriales híbridos y eléctricos. Novedades técnicas y periciales. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/38439>. (consultado: 14 de febrero).

González, D. (2015). Motores Térmicos y sus sistemas auxiliares. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=19ASCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Motor+termico+de+finicion+&ots=Ku3rcPoQeo&sig=nrkcoM-yhBAZzRGtqtc09X9bU#v=onepage&q&f=false>. (Consultado: 4 de enero).

Guía de referencia Hyundai Ioniq Hybrid. Disponible en: <https://owners.hyundaiusa.com/content/dam/hyundai/us/myhyundai/glovebox-manual/2019/ioniq-hev/2019%20Ioniq%20Hybrid%20QRG.pdf>. Consultado (10 de enero).

Herce Cabello, A. (2017). Métodos de decisión multicriterio y sus aplicaciones. Disponible en: https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/TFE002504.pdf. (Consultado: 1 de diciembre).

Jurado, V. (2016). Análisis del sistema inversor de un vehículo híbrido, Toyota Prius. Disponible en: http://192.188.51.77/bitstream/123456789/14074/1/64929_1.pdf. (Consultado: 15 de enero).

Ley 9/2019, de 23 de diciembre, de modificación de la Ley 16/2017, del cambio climático, en cuanto al impuesto sobre las emisiones de dióxido de carbono de los vehículos de tracción mecánica. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2020/01/14/pdfs/BOE-A-2020-442.pdf>. (Consultado: 15 de febrero)

López De Benito, J. (9 de noviembre, 2018). Prueba del Mitsubishi Outlander PHEV 2019. Disponible en: <https://movilidadelectrica.com/prueba-nuevo-mitsubishi-outlander-phev-2019/>. (Consultado: 20 de enero).

Maino, M., Pitter, J. & Kobrich. (1993). Programación Multicriterio: Un instrumento para el diseño de sistemas de producción. Disponible en: <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/14853/100364.pdf?sequence=1>. (Consultado: 1 de diciembre).

Selección de un automóvil híbrido.

Mayorga, D. (2018). Análisis del proceso de recuperación de la batería de alta tensión del vehículo Toyota Highlander Híbrido. Disponible en: <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n8.2018.808>. (Consultado: 6 de marzo).

Méndez, A., Cely, M., Monar, W. (2016) Diseño del Sistema de Freno Regenerativo de Automóviles Híbridos. Revista Politécnica. 37(2). 3-5. Disponible en: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/451/pdf. (Consultado: 5 marzo).

Osorio, C. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. Scientia et Technica. 2(39), 247-248. Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/3217/1849>. (Consultado: 10 de diciembre).

Pallarés, J. (2015). Métodos de decisión multicriterio Electre y Topsis aplicados a la elección de un dispositivo móvil. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5619/fichero/PFC+Jaime+Ruiz+Pallar%C3%A9s.pdf>. (Consultado: 5 de diciembre).

Pernía, M. (2011). Conceptos Básicos de máquinas de corriente continua. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Marino_Pernia/publication/235752021_Conceptos_Basicos_de_Maquinas_de_corriente_continua/links/0912f5131e8e23bfa1000000.pdf. (Consultado: 22 de febrero).

Porto, G. (2009). El Calentamiento Global y las emisiones de carbono. Disponible en: https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/viewFile/626/607. (Consultado: 20 de enero).

REGLAMENTO (UE) 2019/631 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 17 de abril de 2019. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2019/111/L00013-00053.pdf>. (Consultado: 13 de febrero).

Romana, M. & Muñoz, B. (2016). Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructura de transporte. Disponible en: Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte. (Consultado: 5 de diciembre).

Selección de un automóvil híbrido.

Romero, C. (1993). Análisis de las decisiones Multicriterio. Disponible en :
https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/decisiones_multicriterio.pdf. Consultado:
15 de enero.

Tabla de coeficientes de amortización lineal. Disponible en:
https://www.agenciatributaria.es/AEAT.internet/Inicio/_Segmentos_/Empresas_y_profesionales/Empresas/Impuesto_sobre_Sociedades/Periodos_impositivos_a_partir_de_1_1_2015/Base_imponible/Amortizacion/Tabla_de_coeficientes_de_amortizacion_lineal_.shtml. (Consultado: 13 de febrero).

Toskano Hurtado, G. (s/f). El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Disponible en:
http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano_hg/cap3.PDF. (Consultado: 10 de noviembre de 2019).

Trenado, M. (2014). Selección de una cartera de acciones bajo criterios de sostenibilidad medioambiental empleando técnicas de decisión multicriterio. Disponible en:
http://oa.upm.es/30435/1/MANUEL_TRENADO_TORREJON.pdf. (Consultado: 25 de noviembre).

Zapata, S. (2013.) Análisis del sistema de Frenos Regenerativos en un vehículo Toyota Prius. Disponible en: http://192.188.51.77/bitstream/123456789/4830/1/58653_1.pdf. (Consultado: 13 de febrero).

ANEXO A- ALTERNATIVAS DE AUTOMÓVILES

A 1. Toyota Yaris 100 Hybrid



A 2. Kia Niro Hybrid



A 3. Hyundai Ioniq Hybrid



A 4. Mitsubishi Outlander PHEV

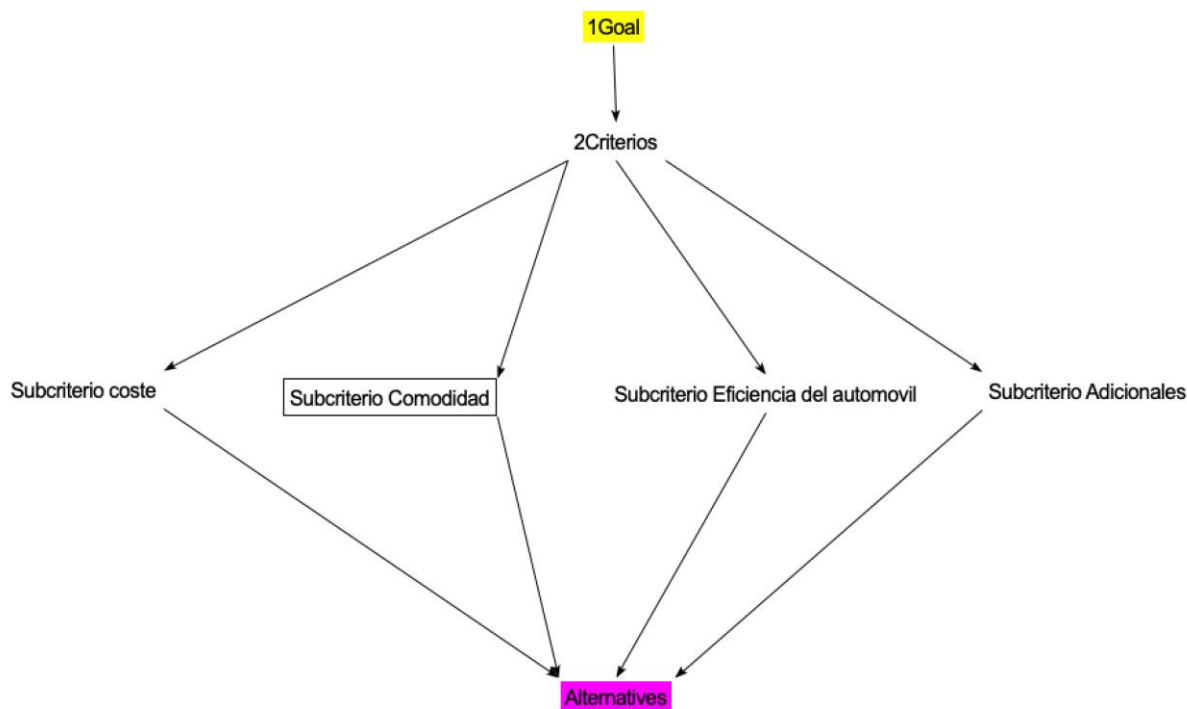


A 5. Volvo V60 T8 Twin Engine



ANEXO B- PROGRAMA SUPER DECISIONS

B 1. Construcción del modelo

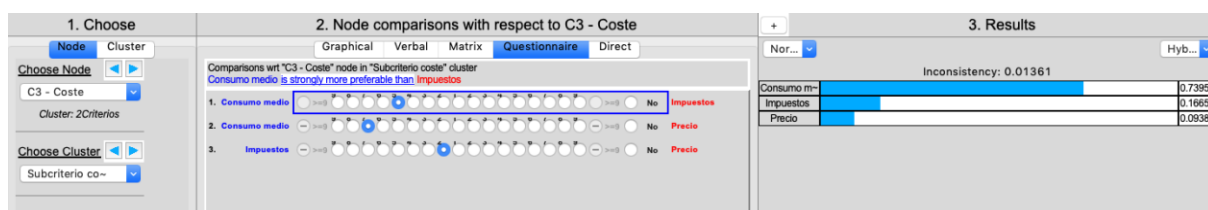


B 2. Comparación por pares

B 2.1. Nivel jerárquico 2



B 2.2. Nivel jerárquico 3



Estudio de Aplicación del Análisis Multicriterio para la toma de decisión en la Selección de un automóvil híbrido.

1. Choose

Node
Cluster

Choose Node
C2 - Comodidad
Cluster: 2Criterios

Choose Cluster
Subcriterio Co-

2. Node comparisons with respect to C2 - Comodidad

Graphical
Verbal
Matrix
Questionnaire
Direct

Comparisons wrt "C2 - Comodidad" node in "Subcriterio Comodidad" cluster
Tamaño is moderately more preferable than Tamaño maletero
1. Tamaño >= < No Tamaño maletero
2. Tamaño >= < No Tipo de transmi-
3. Tamaño maletero >= < No Tipo de transmi-

3. Results

Nor...
Hyb...

Inconsistency: 0.04237

Tamaño	0.66120
Tamaño ma-	0.27178
Tipo de t-	0.06703

1. Choose

Node
Cluster

Choose Node
C1 - Adicional-
Cluster: 2Criterios

Choose Cluster
Subcriterio Ad-

2. Node comparisons with respect to C1 - Adicionales

Graphical
Verbal
Matrix
Questionnaire
Direct

Comparisons wrt "C1 - Adicionales" node in "Subcriterio Adicionales" cluster
Concesionarios y talleres en Cataluña is equally as preferable as Emisiones Co2
1. Concesionarios >= < No Emisiones Co2
2. Concesionarios >= < No Marca
3. Emisiones Co2 >= < No Marca

3. Results

Nor...
Hyb...

Inconsistency: 0.00000

Concesion-	0.10000
Emisiones-	0.10000
Marca	0.80000

1. Choose

Node
Cluster

Choose Node
C4 - Eficienci-
Cluster: 2Criterios

Choose Cluster
Subcriterio Ef-

2. Node comparisons with respect to C4 - Eficiencia del ~

Graphical
Verbal
Matrix
Questionnaire
Direct

Comparisons wrt "C4 - Eficiencia del carro" node in "Subcriterio Eficiencia del automóvil" cluster
Autonomía is equally as preferable as Capacidad deposito combustible
1. Autonomía >= < No Capacidad depos
2. Autonomía >= < No Velocidad maxim
3. Capacidad depos- >= < No Velocidad maxim

3. Results

Nor...
Hyb...

Inconsistency: 0.00885

Autonomia	0.44404
Capacidad-	0.48872
Velocidad-	0.06724

B 2.3 Nivel jerárquico 4

1. Choose

Node
Cluster

Choose Node
Consumo medio
Cluster: Subcriterio cos-

Choose Cluster
Alternatives

2. Node comparisons with respect to Consumo medio

Graphical
Verbal
Matrix
Questionnaire
Direct

Comparisons wrt "Consumo medio" node in "Alternatives" cluster
A1 - Mitsubishi Outlander PHEV is strongly more important than A2 - Kia Niro
1. A1 - Mitsubishi- >= < No A2 - Kia Niro
2. A1 - Mitsubishi- >= < No A3 - Hyundai Io-
3. A1 - Mitsubishi- >= < No A4 - Toyota Yar-
4. A1 - Mitsubishi- >= < No A5 - Volvo V60 -
5. A2 - Kia Niro >= < No A3 - Hyundai Io-
6. A2 - Kia Niro >= < No A4 - Toyota Yar-
7. A2 - Kia Niro >= < No A5 - Volvo V60 -
8. A3 - Hyundai Io- >= < No A4 - Toyota Yar-
9. A3 - Hyundai Io- >= < No A5 - Volvo V60 -
10. A4 - Toyota Yar- >= < No A5 - Volvo V60 -

3. Results

Nor...
Hyb...

Inconsistency: 0.03465

A1 - Mits-	0.39255
A2 - Kia -	0.09534
A3 - Hyun-	0.04449
A4 - Toyo-	0.07508
A5 - Volv-	0.39255

1. Choose

Node
Cluster

Choose Node
Precio
Cluster: Subcriterio cos-

Choose Cluster
Alternatives

2. Node comparisons with respect to Precio

Graphical
Verbal
Matrix
Questionnaire
Direct

Comparisons wrt "Precio" node in "Alternatives" cluster
A2 - Kia Niro is moderately more important than A1 - Mitsubishi Outlander PHEV
1. A1 - Mitsubishi- >= < No A2 - Kia Niro
2. A1 - Mitsubishi- >= < No A3 - Hyundai Io-
3. A1 - Mitsubishi- >= < No A4 - Toyota Yar-
4. A1 - Mitsubishi- >= < No A5 - Volvo V60 -
5. A2 - Kia Niro >= < No A3 - Hyundai Io-
6. A2 - Kia Niro >= < No A4 - Toyota Yar-
7. A2 - Kia Niro >= < No A5 - Volvo V60 -
8. A3 - Hyundai Io- >= < No A4 - Toyota Yar-
9. A3 - Hyundai Io- >= < No A5 - Volvo V60 -
10. A4 - Toyota Yar- >= < No A5 - Volvo V60 -

3. Results

Nor...
Hyb...

Inconsistency: 0.01742

A1 - Mits-	0.09766
A2 - Kia -	0.27093
A3 - Hyun-	0.15236
A4 - Toyo-	0.44341
A5 - Volv-	0.03571

1. Choose

Node

Cluster

Choose Node

Velocidad maxi-

Cluster: Subcriterio Eff-

Choose Cluster

Alternatives

2. Node comparisons with respect to Velocidad maxima

Graphical

Verbal

Matrix

Questionnaire

Direct

Comparisons wrt "Velocidad maxima" node in "Alternatives" cluster

A2 - Kia Niro is strongly more important than A1 - Mitsubishi Outlander PHEV

1. A1 - Mitsubishi-	>=	<=	>	<	>=	<=	No	A2 - Kia Niro
2. A1 - Mitsubishi-	>=	<=	>	<	>=	<=	No	A3 - Hyundai Ioniq
3. A1 - Mitsubishi-	>=	<=	>	<	>=	<=	No	A4 - Toyota Yaris
4. A1 - Mitsubishi-	>=	<=	>	<	>=	<=	No	A5 - Volvo V60
5. A2 - Kia Niro	>=	<=	>	<	>=	<=	No	A3 - Hyundai Ioniq
6. A2 - Kia Niro	>=	<=	>	<	>=	<=	No	A4 - Toyota Yaris
7. A2 - Kia Niro	>=	<=	>	<	>=	<=	No	A5 - Volvo V60
8. A3 - Hyundai Ioniq	>=	<=	>	<	>=	<=	No	A4 - Toyota Yaris
9. A3 - Hyundai Ioniq	>=	<=	>	<	>=	<=	No	A5 - Volvo V60
10. A4 - Toyota Yaris	>=	<=	>	<	>=	<=	No	A5 - Volvo V60

3. Results

Nor...






Hyb...

Inconsistency: 0.06028

A1 - Mitsubishi-	0.07972
A2 - Kia Niro	0.20200
A3 - Hyundai Ioniq	0.41975
A4 - Toyota Yaris	0.26675
A5 - Volvo V60	0.03178

[illegible]

B 3. Resultado final

Name	Graphic	Ideals	Normals	Raw
A1 - Mitsubishi Outlander PHEV		1.000000	0.301595	0.150798
A2 - Kia Niro		0.454697	0.137135	0.068567
A3 - Hyundai Ioniq		0.562359	0.169605	0.084802
A4 - Toyota Yaris 100		0.603760	0.182091	0.091046
A5 - Volvo V60 T8 Twin Engine		0.694885	0.209574	0.104787

ANEXO C- ENCUESTAS PARA LA PONDERACIÓN DE CRITERIOS

En este anexo se exponen las encuestas realizadas, para la ponderación de criterios y subcriterios. La encuesta está dividida en dos partes. La primera parte, está basada en el método AHP y consiste en comparar los criterios por pares mediante una escala predeterminada. Y la segunda parte, para el método programación compromiso, se pide dar una puntuación a los subcriterios a través de una escala establecida

C.1. Encuesta tipo AHP

1. Rellenar la matriz en los espacios en blanco en una escala del 1 al 9, haciendo comparaciones por parejas entre los criterios. Por ejemplo, si el criterio coste del automóvil es extremadamente preferido con respecto al criterio comodidad, entonces se coloca un 9. Esto quiere decir que el criterio coste es 9 veces más importante que el criterio comodidad. De lo contrario si opinas que el criterio coste es menos importante con respecto al criterio comodidad, se coloca su inversa (1/9).

Criterios	Coste	Comodidad	Eficiencia del automóvil	Adicionales
Coste	1			
Comodidad		1		
Eficiencia del automóvil			1	
Adicionales				1

2. Rellenar la matriz en los espacios en blanco en una escala del 1 al 9, haciendo comparaciones por parejas entre los subcriterios. Por ejemplo, si se considera que el precio es fuertemente preferible con respecto al consumo medio, entonces se coloca 1/5 en consumo medio con respecto al precio, es decir, la inversa de 5.

Selección de un automóvil híbrido.

AHP	CM	P	I
CM	1		
P		1	
I			1

a) Coste

AHP	T	TT	TM
T	1		
TT		1	
TM			1

b) Comodidad

AHP	VM	CDC	A
VM	1		
CDC		1	
A			1

c) Eficiencia del automóvil

AHP	M	E	CEC
M	1		
E		1	
CEC			1

d) Adicionales

Escala para la comparación

ESCALA DE PREFERENCIAS

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación Numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

C.2. Encuesta programación compromiso

2. Dar una puntuación a los siguientes subcriterios de selección, según se indique:

2.1. Tipo de transmisión (TT): Se refiere a si el vehículo es automático o manual. La transmisión tiene como objetivo hacer llegar el giro del motor hasta las ruedas, ajustando el par motor a las necesidades de acarreo del vehículo. Para la valoración se mide en: 1 es menos preferido y 5 más preferido.

Alternativa Subcriterio	TYH	KNH	HIH	MO	V60
TT					

2.2. Preferencia de la Marca(M): Se refiere a cuál marca es preferida. Para la valoración se mide en una escala del 1 al 5, donde 1 es nada preferida, 2 poco preferida, 3 medianamente preferida, 4 muy preferida y 5 extremadamente preferida

Alternativa Subcriterio	TYH	KNH	HIH	MO	V60
M					

ANEXO E– DECLARACIÓN DE HONOR

I declare that,

the work in this Master Thesis is completely my own work,

no part of this Master Thesis is taken from other people's work without giving them credit,

all references have been clearly cited,

I'm authorized to make use of the company's related information I'm providing in this document.

I understand that an infringement of this declaration leaves me subject to the foreseen disciplinary actions by The Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH.

Carolina Dávila

Student Name

Signature

27/04/2020

Date

Title of the Thesis: Multicriteria Analysis Application Study for decision-making in the
Selection of a hybrid car.